



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



ÍTALO DE ANDRADE GOMES

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS
COM APROVEITAMENTO MULTIENERGÉTICO

Campina Grande – Paraíba

2015

ÍTALO DE ANDRADE GOMES

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS
COM APROVEITAMENTO MULTIENERGÉTICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: **Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo**

Campina Grande - Paraíba

2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G633d Gomes, Ítalo de Andrade.

Desenvolvimento experimental de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético / Ítalo de Andrade Gomes. – Campina Grande, 2015.

120 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

“Orientação: Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo”.

Referências

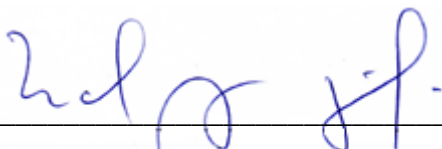
1. Secador de Frutas. 2. Energia Solar. 3. Abacaxi. I. Grilo, Marcelo Bezerra. II. Título.

CDU 631.563.2:634.774(043)

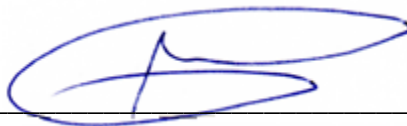
ÍTALO DE ANDRADE GOMES

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM SECADOR SOLAR DE FRUTAS
COM APROVEITAMENTO MULTIENERGÉTICO**

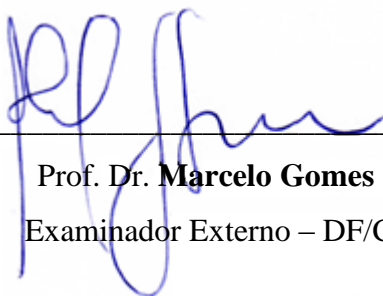
Dissertação apresentada e aprovada em 27 de Fevereiro de 2015, na Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento aos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica à banca examinadora constituída dos seguintes membros:



Prof. Dr. **Marcelo Bezerra Grilo**
Orientador – UAEM/PPGEM/CCT/UFCG



Prof. Dr. **Antonio Gilson Barbosa de Lima**
Examinador Interno – UAEM/PPGEM/CCT/UFCG



Prof. Dr. **Marcelo Gomes Germano**
Examinador Externo – DF/CCT/UEPB

Os relatos da sua trajetória ilibada fizeram-me perceber tamanha a sua grandeza e honradez. A vida foi demasiadamente severa ao tirar-me prematuramente, precisei reconhecer na saudade a pureza do seu amor. Espero ter a capacidade de dignificar o seu nome, pois imenso e profundo é o orgulho de ser teu filho.

Ao meu pai (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão e obediência a Deus, que habilmente escreveu minha história e depositou em minha vida o anseio de utilizar as ferramentas da ciência para o desenvolvimento da humanidade.

À minha mãe Inalda, meu irmão Talles e minha noiva Mayllanne, o mais reservado agradecimento. Gostaria de dizer-lhes que em todos os meus passos têm a marca desse amor que me foi ofertado. Oferecendo-me força, coragem, desvelo e companheirismo, fizeram-me acreditar que nada é impossível.

Aos meus avós paternos, Daniel Gomes e Adalcina, e maternos (*in memoriam*), João Isidoro e Tereza, extensivo a toda minha família, agradeço o apoio e a torcida. Essa conquista é de todos nós.

Ao professor Marcelo, que sem nenhuma objeção aceitou orientar este trabalho, agradeço a experiência e os conhecimentos repassados, engrandecendo-me como profissional e como ser humano.

Dos colegas de curso, levo a certeza que fiz grandes amigos, nos quais sempre pude contar com o apoio e a amizade, dentre os quais destaco os colegas de laboratório: Antônio, Brasileiro e Prof. Jader. É bom saber que temos amigos em quem podemos confiar. Pessoas que nos apoiam e nos acolhem com tanto carinho.

Agradeço a todos que fazem a Universidade Federal de Campina Grande, funcionários e professores, não podendo deixar de destacar a secretária Vanda que sempre se apresentou atenciosa nas mais diversas solicitações.

Não poderia deixar de agradecer de forma grata e grandiosa aos meus amigos de apartamento, Paulo Junior e Rienzy. Nossas amizades só se fortaleceram nesse convívio e permanecerão nas nossas caminhadas.

Aos meus afilhados, José Neto, Heloísa e João Vitor. Embora não tenham conhecimento disto, iluminaram de maneira especial meus pensamentos, levando-me a buscar novos conhecimentos.

Agradeço a todos que fizeram parte da minha vida durante esta caminhada e que, de uma forma ou de outra, cooperaram para a concretização deste trabalho e ajudaram-me a fechar mais uma etapa da minha existência.

Sou uma máquina em construção a procura do
perfeito, se um dia alcançarei tal feito não sei, mas
se a busca incessante me faz corrigir alguns erros,
vale a pena arriscar.

Ítalo de Andrade Gomes

RESUMO

Este trabalho expõe o estudo do desenvolvimento experimental de um sistema de secagem direcionado à produção de frutas desidratadas, com uso da energia solar, sob a utilização de duas formas dessa energia, energia solar fototérmica e energia solar fotovoltaica, que se apresenta como alternativa aos secadores comerciais atualmente existentes que usam energia elétrica. No sistema multienergético, a energia solar fototérmica foi utilizada para aquecer o ar ambiente que é o fluido de trabalho no coletor solar, enquanto que a energia solar fotovoltaica foi utilizada para garantir o fluxo deste fluido na câmara de secagem. Para os testes com o secador, foi escolhido o abacaxi, que tem elevado teor de umidade, sendo altamente perecível, e que também se destaca pela alta demanda e rentabilidade no cenário agrícola de frutas. Na concepção do trabalho apresenta-se como o processo de secagem se realiza e quais os equipamentos utilizados para se efetuar essa técnica, bem como, as formas de energia utilizadas. Todos os materiais utilizados são de baixo custo e facilmente encontrados na região. Os testes experimentais foram realizados nas cidades de Campina Grande e Patos, ambas no estado da Paraíba, no período da primavera e verão do ano de 2014. São apresentados os resultados obtidos em cinco testes experimentais, que permitiram a obtenção das curvas de secagem para cada experimento e calculados o rendimento do equipamento e a eficiência do processo de secagem. Os resultados obtidos mostraram que o sistema desenvolvido e testado experimentalmente na produção de abacaxi desidratado funcionou. Esses resultados foram comparados com valores já relatados na literatura e mostraram-se suficientes para produzir um produto final de qualidade elevada, com teor de umidade final na faixa de 20% a 24%. A média do rendimento térmico obtido no equipamento foi de 36%, enquanto que a média da eficiência do processo de secagem foi de 95%. Com a análise dos resultados, ficou comprovada a operacionalidade funcional e construtiva do sistema de secagem multienergético desenvolvido, que contribui para promoção do desenvolvimento sustentável porque utiliza como fonte energética apenas energia de origem solar.

Palavras-chave: Secador de frutas. Energia solar. Abacaxi.

ABSTRACT

This work presents an experimental study development of a drying system directed to the production of dehydrated fruit, with use of solar energy, in the use of two forms of this energy, photothermal solar energy and photovoltaic solar energy, which is an alternative to dryers commercial currently exist that use electricity. In multi energy system, the photothermal solar energy is used to heat the room air which is the working fluid in the solar collector, while the photovoltaic solar energy was used to ensure the flow of this fluid in the drying chamber. For tests with the dryer, was chosen the pineapple, which has high moisture content and is highly perishable, and that also stands out for the high demand and profitability in the agricultural scenario of fruit. The design of the work is presented as the drying process takes place and what equipment used to perform this technique, as well as the forms of energy used. All materials used are inexpensive and easily found in region. The experimental tests were conducted in the cities of Campina Grande and ducks, both in the state of Paraíba, during the spring and summer of 2014. Are shown the results obtained in five tests which allowed obtaining the drying curves for each experiment and calculating the efficiency of the equipment and the efficiency of the drying process. The results showed that the system developed and tested experimentally in the dehydrated pineapple production worked. These results were compared with values already reported in the literature and shown to be sufficient to produce a final product of high quality final with moisture content in the range of 20% to 24%. The temperature efficiency in the equipment was 36%, while the average drying process efficiency was 95%. With the analysis of the results, it was proved the functional and constructive operation of multienergético drying system developed, which contributes to promoting sustainable development because it uses as an energy source of solar energy only.

Keywords: Dryer fruit. Solar energy. Pineapple.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação da transferência de calor e massa em produtos biológicos	23
Figura 2.2 – Esquema da composição da massa de produtos biológicos	24
Figura 2.3 – Fluxograma para produção de frutas desidratadas	34
Figura 2.4 – Fluxograma de classificação dos secadores	35
Figura 2.5 – Protótipos de secadores solares de exposição direta da UFCG	37
Figura 2.6 – Representação de um sistema de secagem solar de exposição indireta	39
Figura 2.7 – Protótipo de um secador híbrido de exposição indireta da UFCG	39
Figura 2.8 – Representação esquemática do efeito estufa	42
Figura 2.9 – Representação esquemática de uma célula fotovoltaica	43
Figura 2.10 – Representação do movimento de rotação da Terra	44
Figura 2.11 – Representação do movimento da Terra em torno do sol	45
Figura 3.1 – Laboratório experimental de máquinas térmicas, UFCG	48
Figura 3.2 – <i>Solarium</i> do LEMT, UFCG	48
Figura 3.3 – Localização das cidades de Patos e Campina Grande no mapa da Paraíba	49
Figura 3.4 – Abacaxi armazenado em sacos com fechamento hermético	50
Figura 3.5 – Etapas do processo de desenvolvimento de produto	51
Figura 3.6 – Secador solar acoplado por dutos	52
Figura 3.7 – Protótipo preliminar de isopor do secador solar de frutas	53
Figura 3.8 – Sistema de exaustão para secador solar de frutas	53
Figura 3.9 – Secador solar de frutas com aproveitamento multienergético	53
Figura 3.10 – Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido	57
Figura 3.11 – Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida	58
Figura 3.12 – Desenho esquemático da chaminé desenvolvida	58
Figura 3.13 – Detalhes do coletor solar desenvolvido	59
Figura 3.14 – Detalhes da câmara de secagem desenvolvida	59
Figura 3.15 – Detalhes da chaminé desenvolvida	60
Figura 3.16 – Anemômetro digital (modelo VEC-GM 8901 – Vectus)	62
Figura 3.17 – Multímetro digital (modelo ET 1400 – Minipa)	63
Figura 3.18 – Balança digital (modelo KC 01 – Western)	64

Figura 4.1 – Abacaxi desidratado obtido em E1	67
Figura 4.2 – Temperaturas obtidas para E1	68
Figura 4.3 – Valores de temperaturas obtidos para o secador de exposição direta	69
Figura 4.4 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E1	71
Figura 4.5 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E1	71
Figura 4.6 – Temperaturas obtidas para E2	73
Figura 4.7 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E2	76
Figura 4.8 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E2	76
Figura 4.9 – Temperaturas obtidas para E3	77
Figura 4.10 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E3	79
Figura 4.11 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E3	80
Figura 4.12 – Temperaturas obtidas para E4	80
Figura 4.13 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E4	83
Figura 4.14 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E4	83
Figura 4.15 – Temperaturas obtidas para E5	84
Figura 4.16 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E5	86
Figura 4.17 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E5	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo, em 2013	30
Tabela 2.2 – Ranking da participação regional na produção nacional de abacaxi, em 2014	31
Tabela 2.3 – Teor de umidade do abacaxi <i>in natura</i>	32
Tabela 3.1 – Grandezas de alguns componentes do secador desenvolvido	56
Tabela 3.2 – Modelos matemáticos empregados para ajustes das curvas de secagem	65
Tabela 4.1 – Valores obtidos em E1	70
Tabela 4.2 – Valores obtidos em E2	74
Tabela 4.3 – Valores obtidos em E3	77
Tabela 4.4 – Valores obtidos em E4	81
Tabela 4.5 – Valores obtidos em E5	84
Tabela 4.6 – Parâmetros de secagem	88
Tabela 4.7 – Propriedade do ar de secagem	88
Tabela 4.8 – Potência útil e rendimento para cada processo	88
Tabela 4.9 – Resumo das eficiências dos processos de secagem	89
Tabela 4.10 – Resumo dos coeficientes de correlação obtidos para cada experimento	90
Tabela 4.11 – Planilha de custos para fabricação de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
E1	Experimento 1
E2	Experimento 2
E3	Experimento 3
E4	Experimento 4
E5	Experimento 5
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (Organização da Agricultura e Alimentação)
GEDS	Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAF	Instituto Brasileiro de Frutas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LEMT	Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Painel de Fibra de Média Densidade)
OMS	Organização Mundial da Saúde
PB	Paraíba
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
TACO	Tabela de Composição de Alimentos
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Justificativa da escolha do tema	19

CAPÍTULO II

2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	22
2.1	Princípios da secagem	22
2.1.1	Métodos de determinação da umidade	26
2.1.2	Curvas de secagem	27
2.2	A importância econômica e nutricional das frutas	28
2.2.1	O abacaxi	29
2.2.2	As frutas desidratadas	32
2.3	Secadores de frutas	34
2.3.1	Tipos de secadores	35
2.3.2	Secadores solares	36
2.3.3	Secador solar de exposição direta	37
2.3.4	Secador solar de exposição indireta	38
2.4	O sol como fonte de energia	40
2.4.1	Energia solar fototérmica	41
2.4.2	Energia solar fotovoltaica	43
2.4.3	Movimento aparente do sol	44

CAPÍTULO III

3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Metodologia	48
3.2	Desenvolvimento do secador solar	50
3.2.1	Materiais utilizados	54

3.2.2	Dimensionamento	55
3.2.3	Coletor solar	56
3.2.4	Câmara de Secagem	57
3.2.5	Chaminé	58
3.3	Características construtivas do protótipo desenvolvido	58
3.4	Avaliação de desempenho	60
3.4.1	Rendimento térmico do equipamento	60
3.4.2	Eficiência do processo de secagem	63
3.5	Determinação das curvas de secagem	64

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Análise dos testes experimentais	68
4.1.1	Teste E1, realizado nos dias 15 e 16 de novembro de 2014	68
4.1.2	Teste E2, realizado nos dias 27 e 28 de novembro de 2014	73
4.1.3	Teste E3, realizado nos dias 09 e 10 de dezembro de 2014	77
4.1.4	Teste E4, realizado nos dias 12 e 13 de dezembro de 2014	80
4.1.5	Teste E5, realizado nos dias 21 e 22 de dezembro de 2014	84
4.1.6	Resumo dos rendimentos do equipamento e das eficiências dos processos para cada experimento	87
4.2	Custos de fabricação	91

CAPÍTULO V

5	CONCLUSÕES	94
---	------------	----

REFERÊNCIAS	96
--------------------	----

APÊNDICES

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Colocar o conhecimento científico a serviço do desenvolvimento da humanidade, respeitando o uso dos recursos naturais e privilegiando a eficiência energética, deve ser o trabalho de todo engenheiro, principalmente agora que o desenvolvimento sustentável é referência mundial de modelo a ser seguido nos países, nas empresas e na sociedade.

O aprimoramento da ideia de sustentabilidade avançou nas últimas décadas e ganhou espaço em diversos países que visam se desenvolver de maneira sustentável, causando menor impacto ambiental e maior rentabilidade.

Dentro dessa temática de desenvolvimento sustentável, a principal questão a ser levantada é o descobrimento e aperfeiçoamento de energias renováveis que permitam a concepção de novos equipamentos com competitividade técnica e econômica, mas que não causem prejuízos ambientais irreparáveis para a humanidade.

Sabe-se que o esgotamento ou a inconveniência de um recurso energético exige estudos que viabilizem o surgimento de outras fontes que venham a compensar e/ou garantirem o melhoramento de tais recursos. Isso significa buscar fontes alternativas que visem à comodidade e segurança do homem, assim como a preservação do meio ambiente.

Em algumas partes do mundo, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na disseminação de tecnologias apropriadas para fomentar a produção agrícola, principalmente em países em desenvolvimento que precisam aumentar a produtividade nos processos agrícolas e industriais para torná-los competitivos (Waewsak, Chindaruksa e Punlek, 2006).

Segundo Akinola, Akinyemi e Bolaji (2006), as tecnologias solares estão ganhando rápida aceitação como medida de economia de energia aplicada na agricultura, sendo preferíveis a outras fontes alternativas de energia porque são abundantes, inesgotáveis e menos poluentes.

Para Silva (2013), a utilização de energias renováveis ganha cada vez mais prestígio no mundo pós-moderno, em função do surgimento de políticas de substituição das fontes energéticas de origem fóssil por fontes renováveis, principalmente energia solar e eólica.

O Brasil é um país de dimensões continentais e está geograficamente posicionado numa zona de excepcional disponibilidade de energia solar. Utilizar, aqui, essa fonte de energia é particularmente importante, porque o país tem o desafio de promover a mobilidade social e precisa fazer isto incentivando seu desenvolvimento tecnológico de modo sustentável.

Ambiciona-se que o crescimento socioeconômico ocorra em sintonia com o mundo globalizado de avançadas tecnologias, porém, com ações locais que priorizem a pesquisa e o desenvolvimento de máquinas simples, de fácil construção, manutenção e operação, preferencialmente de baixo custo, que respondam pelas demandas típicas de nosso desenvolvimento.

Com o foco na promoção do desenvolvimento regional, este trabalho representa o interesse em disseminar a utilização de novas tecnologias nos processos de secagem de alimentos no setor da fruticultura, permitindo a comercialização de um produto de boa qualidade, pautado no processamento de baixo custo, aumentando, a rentabilidade na cadeia produtiva desses alimentos.

Nesse contexto, sabendo-se do alto grau de perecimento das frutas, buscou-se desenvolver um secador de alimentos com o aproveitamento da energia solar sob a utilização de duas formas dessa energia: a fototérmica e a fotovoltaica.

O equipamento desenvolvido representa uma alternativa para a produção de alimentos desidratados para ser utilizado, principalmente, em comunidades carentes e no ambiente da agricultura familiar, sendo também, uma opção de geração de emprego e renda para essas pessoas, a partir da produção e comercialização desses produtos na forma desidratada.

Dessa forma, o secador solar caracteriza-se como um equipamento que contribui para promover o desenvolvimento sustentável, pois garantirá um crescimento econômico para os produtores rurais e, conseqüentemente, sua ascensão socioeconômica, sem prejuízo das condições ambientais existentes.

O protótipo do equipamento desenvolvido foi testado na desidratação do abacaxi, que tem o estado da Paraíba como um dos principais produtores no Brasil, cujo cultivo permite ampla geração de emprego no ambiente da agricultura familiar, carente de tecnologias simples e de baixo custo para concorrer no competitivo mercado de produtos agrícolas.

A escolha do setor frutífero decorre da sua importância no cenário econômico do Nordeste brasileiro e do amplo valor a ele empregado na nutrição humana. A utilização

do secador solar tem como finalidade uma melhor conservação desses produtos para que ocorra uma comercialização mais duradoura e lucrativa, permitindo o fornecimento de alimentos climatéricos, mesmo em tempos de entressafra.

O surgimento de secadores dimensionados adequadamente para a secagem de frutas e, principalmente, com custos mais acessíveis, fez crescer o mercado de frutas desidratadas nos últimos anos, bem como a diversificação do segmento, que passou a produzir, além da banana desidratada, frutas secas como a maçã, o mamão, a manga e o abacaxi (Costa, 2008).

Neste trabalho são apresentadas as características construtivas e de funcionamento do sistema de secagem solar desenvolvido e as curvas de secagem do abacaxi obtidas experimentalmente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver experimentalmente, incluindo a concepção, dimensionamento, construção e testes, um sistema de secagem para ser utilizado na produção de frutas desidratadas, usando a energia solar como fonte de energia no processo de secagem.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um equipamento de captação da energia solar acoplado a uma câmara de secagem que atenda à demanda necessária ao processo de desidratação de frutas, principalmente abacaxi;
- Dimensionar, construir e testar um mecanismo que permita uma melhor circulação e controle do ar ambiente no interior do secador solar e da câmara de secagem;

- Testar experimentalmente o sistema em desenvolvimento para obtenção da curva de secagem do abacaxi;
- Testar experimentalmente o sistema em desenvolvimento para obtenção da eficiência do processo de secagem;
- Testar experimentalmente o sistema em desenvolvimento para obtenção do seu rendimento térmico;
- Analisar os resultados obtidos durante o processo de secagem do abacaxi para observar a operacionalidade funcional e dimensional do equipamento, buscando a maximização da eficiência energética e operacional do mesmo.

1.2 Justificativa da escolha do tema

Segundo Lacerda (2012), a maioria dos produtores rurais do Brasil é constituída por pequenos proprietários, tendo como mão de obra predominante o núcleo familiar, denominando a agricultura familiar. O processo de produção agrícola na agricultura familiar demanda por equipamentos simples para realizar suas atividades. Estes equipamentos devem, preferencialmente, ser de baixo custo, caracterizando-se também por sua facilidade de operação e manutenção.

Procurando interagir com esta realidade no ambiente da produção agrícola brasileira, o Grupo de Pesquisa em Energia e Desenvolvimento Sustentável (GEDS), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tem trabalhado no desenvolvimento de secadores que utilizam a energia solar. Desde 2007, vários protótipos foram construídos e testados nas mais diversas situações de utilização, repassando essa tecnologia para os pequenos produtores da região.

Cada novo sistema de secagem desenvolvido apresenta características singulares e caminha na direção da melhoria da sua eficiência energética, utilizando tecnologia apropriada, empregando materiais facilmente encontrados na região e com limite de

custos construtivos e operacionais, para que os equipamentos tenham a inserção no mercado facilitada.

O uso da energia solar como fonte de energia predominante no equipamento é indispensável para o compromisso com a promoção do desenvolvimento sustentável.

A escolha do abacaxi como matéria-prima a ser desidratada justifica-se na importância que essa fruta representa para a economia do estado da Paraíba e para o Brasil. Em geral, a desidratação deste produto, atualmente, acontece com uso de eletricidade e/ou gás liquefeito de petróleo (GLP), fontes energéticas que precisam ser substituídas por fontes renováveis que favoreçam o meio ambiente.

Capítulo II
REFERENCIAIS TEÓRICOS

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

No mundo globalizado, os setores industriais, comerciais e de serviços estão cada vez mais compromissados com o desenvolvimento sustentável, focando seus processos em mecanismos que promovam a preservação das condições ambientais, sem abdicar de uma produção com redução de custos que favoreça uma maior rentabilidade.

Para determinar a rentabilidade de um processo de secagem de um produto agrícola, deve ser levado em consideração, dentre outros parâmetros, a qualidade final do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo.

Para apresentar os resultados obtidos no desenvolvimento de um equipamento voltado à produção de frutas desidratadas, é preciso expor a teoria que embasa esse contexto de rentabilidade atrelado ao uso de energias “limpas”.

Nesse contexto, nesse capítulo, será exposto o que é e como acontece o processo de secagem das frutas, destacando sua importância econômica e nutricional, quais os equipamentos mais utilizados para se efetuar a desidratação e as formas de energia mais utilizadas.

2.1 Princípios da secagem

Os altos índices de desperdício relacionados com a produção alimentícia são, na maioria das vezes, provenientes da degradação natural causada pela elevada quantidade de umidade presente nos alimentos.

Um dos grandes problemas enfrentados pelos agricultores é a necessidade de conseguir níveis seguros de armazenagem para minimizar os riscos de deterioração dos produtos agrícolas que, na maioria das vezes, são colhidos com teores de umidade superiores ao recomendado.

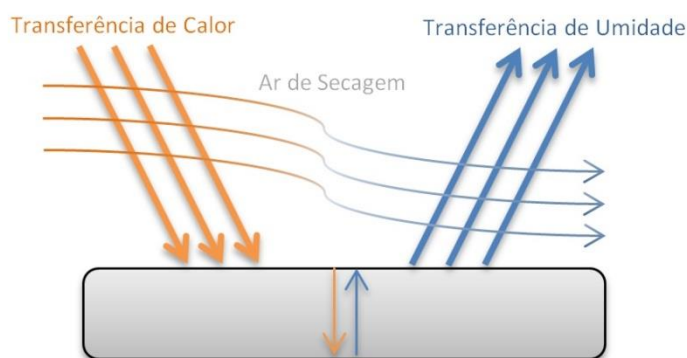
A redução de umidade do produto agrícola, através da secagem, ou seja, da retirada de água de seu interior, inviabiliza a manutenção de condições propícias à proliferação de bactérias e fungos, evitando-se a rápida degradação do mesmo. Assim sendo, o processo de secagem apresenta-se como uma solução para a conservação de alimentos.

Segundo Costa (2008), a secagem de um alimento consiste, basicamente, na redução de seu teor de umidade a um nível no qual seu metabolismo e/ou dos microrganismos a ele associados sejam minimizados.

Lima (1999) ressalta que quando um sólido é submetido à secagem, observam-se dois fenômenos que ocorrem simultaneamente. Nesse processo, é necessário fornecer calor ao material úmido para que a água possa ser transportada do interior do sólido até sua superfície, permitindo, assim, a evaporação de água da superfície do material para o ambiente. Na Figura 2.1 é mostrada uma representação dos processos de transferência de calor e massa em produtos biológicos.

O processo de fornecimento de calor para o material úmido será responsável pela evaporação da água do material, seguindo-se a transferência de massa que arrastará o vapor formado.

Figura 2.1 – Representação da transferência de calor e massa em produtos biológicos.



Fonte: Próprio autor.

Por ser um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto a ser secado e o ar de secagem, a secagem influencia nas características do produto final e tem efeito direto na sua qualidade. Se for mal conduzida pode causar a deterioração do produto ou reduzir a qualidade do mesmo, diminuindo seu rendimento nas etapas de processamento.

A quantidade de água removida durante o processo de secagem é calculada em função dos teores de umidade inicial e final do produto a ser desidratado e da massa total do produto antes de iniciar o processo. Esses teores podem ser expressos como a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, como determina a Equação 2.1.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2.1)$$

Onde,

X_{bs} = teor de umidade, em base seca, decimal;

m_{H_2O} = massa de água contida no produto, kg;

m_{ms} = massa de matéria seca, kg.

Outra forma de expressar esses teores é através da relação entre a massa de água contida no produto e a massa total do mesmo, como mostrado na Equação 2.2. Essa relação é conhecida como teor de umidade em base úmida.

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_t} \quad (2.2)$$

Onde,

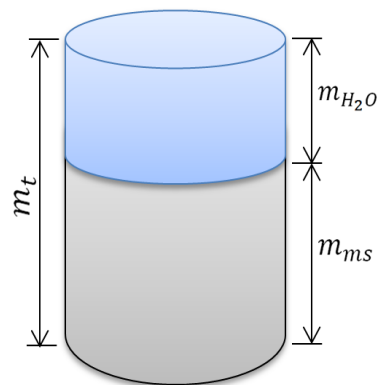
X_{bu} = teor de umidade, em base úmida, percentual;

m_t = massa total do produto, kg.

A Figura 2.2 representa o esquema da composição da massa de um produto biológico, onde se observa que a massa total desse produto, como mostrado na Equação 2.3, é composta por uma fração de massa de matéria seca e outra de massa de água. Portanto:

$$m_t = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (2.3)$$

Figura 2.2 – Esquema da composição da massa de produtos biológicos.



Fonte: Próprio autor.

Assim, é possível obter a determinação de teor de umidade em base seca ou em base úmida correlacionando as equações já citadas, obtendo-se a Equação 2.4.

$$X_{bu} = \frac{100 * X_{bs}}{1 + X_{bs}} \quad \text{ou} \quad X_{bs} = \frac{X_{bu}}{100 - X_{bu}} \quad (2.4)$$

Assumindo que apenas água seja removida durante o processo de secagem, tem-se que a quantidade de matéria seca se mantém constante e, relacionando a Equação 2.3 com a Equação 2.4 obtém-se a Equação 2.5:

$$m_{msi} = m_{msf} = \frac{m_{ti}}{1 + X_{bsi}} \quad (2.5)$$

Onde,

m_{msi} = massa inicial de matéria seca, kg;

m_{msf} = massa final de matéria seca, kg;

m_{ti} = massa inicial total do produto, kg;

X_{bsi} = teor de umidade inicial, base seca, decimal.

Logo, a quantidade de água removida é expressa pela Equação 2.6:

$$m_{H_2O i} - m_{H_2O f} = m_{ti} \frac{(X_{bsi} - X_{bsf})}{1 + X_{bsi}} \quad (2.6)$$

Onde,

$m_{H_2O i}$ = massa de água contida no produto antes do processo de secagem em kg;

$m_{H_2O f}$ = massa de água contida no produto depois do processo de secagem em kg;

X_{bsf} = teor de umidade final, base seca, decimal.

A umidade dos produtos biológicos está diretamente relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição, podendo afetar propriedades determinantes para a sua estocagem, embalagem e/ou processamento. Por isso, sua determinação é uma das medidas mais importantes e utilizadas na análise de alimentos, sendo fundamental para o processo de secagem.

Pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 272, de 22 de setembro de 2005, que aprova o regulamento técnico para produtos vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis, são estabelecidos os requisitos específicos para determinação de frutas secas ou desidratadas (exceto frutas secas tenras), que devem possuir umidade máxima de 25% (Brasil, 2005).

2.1.1 Métodos de determinação da umidade

A determinação do teor de umidade em alimentos pode ser feita de diversas formas e a escolha do método a ser utilizado vai depender, dentre outros fatores, da forma como a água está presente na amostra, da natureza da amostra e da rapidez desejada na determinação.

A água pode estar presente na amostra sob duas formas: água livre ou água ligada.

- **Água livre:** é a água que está simplesmente adsorvida no material, sendo a mais abundante na composição dos alimentos. É perdida facilmente para o ambiente a baixas temperaturas.
- **Água ligada:** é a água da constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais. Necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Dependendo da natureza da amostra, requer temperaturas diferentes para a sua remoção, que frequentemente não é total e, em alguns casos, não é eliminada nem a temperaturas que carbonizem parcialmente a amostra.

O aquecimento de frutas pode causar sua caramelização ou decomposição dos açúcares, perda de voláteis ou ainda a oxidação dos lipídeos. Sendo assim, é importante uma avaliação criteriosa e cuidadosa para a escolha do método mais adequado e conveniente à amostra.

As determinações de umidade são classificadas em métodos diretos e métodos indiretos.

- **Métodos diretos**

Nos métodos diretos, a água é retirada do produto geralmente por processo de aquecimento, e o teor de umidade é calculado pela diferença de peso (medida da massa) das amostras no início e no fim do processo.

Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos (Dalpasquale, 2002).

Por exigir um tempo relativamente longo para sua execução, às vezes representa uma desvantagem do método, por exemplo, quando se necessita de resposta imediata no controle de uma determinada operação.

Como exemplos de métodos diretos para determinação dos teores de umidade de um produto, têm-se: estufa, infravermelho e destilação.

- **Métodos indiretos**

Nos métodos indiretos, o teor de umidade é estimado em função das propriedades elétricas do produto em uma determinada condição.

São métodos práticos e rápidos, mas estão sujeitos a erros decorrentes da variação das propriedades físicas dos produtos, da temperatura ou da distribuição da umidade no interior do mesmo.

Os dois princípios empregados são o da resistência elétrica e o da medida da constante dielétrica (capacitância).

2.1.2 Curvas de secagem

Segundo Cano-Chauca *et al.* (2004), as curvas de secagem permitem prever o momento do processo no qual se atinge o teor de umidade desejado e desta forma obter produto de boa qualidade.

Os processos de secagem envolvem vários mecanismos físicos que descrevem a transferência de umidade em um produto, tornando a determinação das curvas de secagem um procedimento que envolve várias teorias.

A velocidade com a qual um alimento perde água, quando ele passa por um processo de secagem, não é constante ao longo do processo. Geralmente, com o

progresso da secagem, a taxa de remoção de água diminui. Na prática, em condições normais de operação, o nível zero de umidade dificilmente é alcançado (Fioreze, 2004).

Convencionou-se a utilização de modelos semi-teóricos, para prever o processo de secagem, devido o menor tempo de solução requerido em relação aos modelos teóricos, além de não serem necessárias considerações quanto à geometria do produto, difusividade mássica e propriedades termo físicas (Massaud, 2004).

Dentre os modelos empíricos de secagem em camada delgada, os mais empregados são os modelos de Lewis e de Page (Panchariya, Popovic e Sharma, 2002).

Para Fiorentin *et al.* (2012), o modelo de Lewis assume que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o conteúdo de umidade em um determinado tempo e o conteúdo de umidade de equilíbrio do material, sendo geralmente utilizado para prever o comportamento das curvas de secagem de produtos agrícolas com elevada quantidade de açúcar, em camada fina.

Segundo Quintero (2007), quando comparados os resultados obtidos experimentalmente com aqueles do modelo exponencial, o modelo de Page permite, com uma equação empírica simples, obter um modelo mais preciso para descrever mudanças nos resultados observados, especialmente para o estágio inicial da secagem.

2.2 A importância econômica e nutricional das frutas

No Brasil, a base agrícola da cadeia produtiva de frutas já ultrapassou 2,2 milhões de hectares cultivados, sendo responsável pela geração de, aproximadamente, cinco milhões de empregos diretos. Com um volume estimado de 43,6 milhões de toneladas produzidas, a fruticultura atinge um valor bruto de R\$ 20 bilhões (IBRAF, 2013). Consequentemente, o segmento frutícola está entre os principais geradores de renda, de empregos e de desenvolvimento rural.

Como citado por Gomes, Nunes e Grilo (2014a), além de representarem uma importante parcela na economia de um país, as frutas exercem um papel fundamental na nutrição humana, sendo fonte indispensável de vitaminas, minerais e fibras.

Para Neutzling *et al.* (2009), a diminuição do risco de mortalidade e redução da ocorrência de doenças crônicas, tais como, as doenças cardiovasculares, derrames e alguns tipos de câncer, têm sido associados ao consumo de frutas, legumes e verduras.

Em seu Relatório Técnico 916/2003, sobre prevenção de doenças crônicas, a Organização Mundial da Saúde (OMS) afirma que existem evidências convincentes de que o consumo de frutas e verduras também diminui o risco de diabetes e obesidade. Na mesma publicação, a OMS recomenda um consumo mínimo de pelo menos cinco porções diárias de frutas, legumes e verduras, o que equivale a 400 g ou mais por dia.

No entanto, estima-se que o consumo de frutas no Brasil corresponda a menos da metade das recomendações nutricionais relatadas, sendo ainda mais deficiente entre as famílias de baixa renda (Levy-Costa *et al.*, 2005).

De acordo com Soares (2002), um fator que acentua ainda mais o problema da desnutrição humana é a diminuição da disponibilidade de alimentos, agravada pela expansão da população mundial. Esse desequilíbrio entre a população e a oferta de alimentos é crescente, mas pode ser minimizado através da redução das perdas que ocorrem nas diferentes etapas da obtenção dos alimentos, desde a produção até o consumo.

Para tanto, faz-se necessário o emprego de tecnologias de fácil domínio que promovam a diminuição do desperdício de frutas e hortaliças, que ocasionam, em curto prazo, enormes impactos para o País. Com essa iniciativa, haveria uma diminuição de custos operacionais e uma maior disponibilização de alimentos saudáveis ao consumidor, gerando uma melhor remuneração ao produtor rural e uma maior estabilização de preços ao consumidor.

2.2.1 O abacaxi

Da família das bromeliáceas, o abacaxizeiro (*Ananas comosus* (L) Merrill) é classificado como uma planta monocotiledônea, herbácea e perene (Reinhardt, Souza e Cabral, 2000). Tem elevada demanda e alta rentabilidade no cenário agrícola de frutas e sua cultura é o segundo cultivo tropical de importância mundial, representando cerca de 20% do volume de frutas tropicais.

Por apresentarem ótimas qualidades organolépticas, decorrente do sabor e aroma característicos, sendo, também, considerada boa fonte de vitaminas, açúcares e fibra, o abacaxi é bastante apreciado para o consumo tanto *in natura* como industrializado e é indicado para auxiliar no processo digestivo humano.

Para Aguiar *et al.* (2014), o abacaxi presta-se para as mais diversas formas de processamento industrial, podendo ser utilizado em pedaços, em calda, sucos, pedaços cristalizados, geleias, licor, vinho, etc., obtendo-se como subproduto da industrialização álcool, rações para animais, enzimas de uso medicinal, dentre outros.

Dentre as cultivares mais exploradas pelo mundo destacam-se: *Smooth Cayenne*, *Singapore Queen*, *Red Spanish*, *Perola* e *Perolera* (Gonçalves, 2000). No entanto, estima-se que 70% da produção mundial de abacaxi tenha como base a cultivar *Smooth Cayenne* (Figueiredo, Queiroz e Noronha, 2003).

Pelos dados da Organização da Agricultura e Alimentação (FAO, 2014), apenas os cinco principais produtores mundiais de abacaxi chegaram a produzir, aproximadamente, 12 milhões de toneladas do fruto no ano de 2013, representando cerca de 60% da produção mundial.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), em seu levantamento sistemático da produção agrícola, a região Nordeste aparece com, aproximadamente, 40% da produção brasileira de abacaxi, tendo o estado da Paraíba como seu principal representante, com uma produção superior as 309.000 (trezentos e nove mil) toneladas, ficando atrás, em cenário nacional, apenas do estado do Pará, que aparece com, aproximadamente 326.000 (trezentos e vinte e seis mil) toneladas.

Na Tabela 2.1 está o ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo, com suas respectivas produções e na Tabela 2.2 consta o ranking da participação regional em relação à produção nacional de abacaxi em 2014.

Tabela 2.1 – Ranking dos principais produtores de abacaxi do mundo, em 2013.

Ordem	País	Produção [toneladas]
1º	Tailândia	2.650.000
2º	Costa Rica	2.484.729
3º	Brasil	2.478.178
4º	Filipinas	2.397.628
5º	Indonésia	1.780.889

Fonte: Adaptado de FAO (2014).

Tabela 2.2 – Ranking da participação regional na produção nacional de abacaxi, em 2014.

Ordem	País	Participação na Safra 2014 [%]
1º	Nordeste	39,9
2º	Sudeste	28,6
3º	Norte	25,4
4º	Centro-Oeste	5,8
5º	Sul	0,3

Fonte: Adaptado de IBGE (2014).

As cultivares mais plantadas no Brasil são a *Perola* (regiões Norte e Nordeste, tendo o Pará e a Paraíba como seus principais produtores) e a *Smooth Cayenne* (região Centro-Oeste, com destaque para a produção do estado de Minas Gerais), sendo a cultivar *Perola*, considerada insuperável para o consumo *in natura*, graças a sua polpa suculenta e saborosa (Cunha, 2007).

Segundo Nascente, Costa e Costa (2005), o período de colheita do abacaxi varia de acordo com o grau de tecnologia empregada na plantação, podendo ser ofertado durante todo o ano se for utilizado técnicas de irrigação e reguladores de florescimento.

No entanto, nos períodos de entressafra acontece perda de qualidade do produto, chegando a perder, aproximadamente, 30% da massa. Portanto, recomenda-se a colheita entre os meses de novembro a abril, com pico de janeiro a março.

Como o abacaxi não amadurece após a colheita, faz-se necessária sua colheita após seu completo desenvolvimento fisiológico, colhendo-se os frutos em estágios de maturação diferentes, de acordo com sua destinação e a distância do mercado consumidor.

Porém, o abacaxi apresenta elevado conteúdo de umidade, sendo, portanto, altamente perecível, ocasionando perdas significativas entre a colheita e a mesa do consumidor. Daí, a necessidade da utilização de processos capazes de conservar tais produtos e que garantam a oferta do produto ao longo de todo o ano.

Na Tabela 2.3 estão apresentados os valores encontrados para o teor de umidade do abacaxi *in natura* reportado na literatura:

Tabela 2.3 – Teor de umidade do abacaxi *in natura*.

Tabela	Teor de Umidade [%]	Referência
IBGE	85,4	Orikasa <i>et al.</i> (2008)
TACO	86	Oliveira, Oliveira e Park (2006)

Fonte: Próprio autor.

Para efetuar as análises do processo, utilizou-se o teor de umidade fornecido pela tabela do IBGE, pois se trata de uma autarquia que compõe a administração pública federal, podendo ter seus dados empregados para fins comerciais.

2.2.2 As frutas desidratadas

Para a desidratação, indicam-se a escolha de frutas de maior importância econômicas, sendo as mais adequadas para o processamento a banana, a uva, a ameixa, a manga, a maçã e o abacaxi.

As frutas secas representam uma fonte concentrada de calorias, fibras, vitaminas, açúcar natural e alguns nutrientes, além de terem um prazo de validade muito maior que as frutas frescas, devido à diminuição da concentração da água no produto.

O processo termodinâmico da secagem permite estabilizar a atividade microbiológica e reduzir as reações químicas e enzimáticas, permitindo a disponibilidade do fruto durante todo o ano, além de reduzir sua massa e, consequentemente, os custos de transporte e de armazenamento, sem afetar suas características organolépticas nem sua qualidade nutricional.

Dessa forma, está sendo verificado um aumento na demanda por alimentos processados que mantenham suas características as mais próximas possíveis dos produtos originais nas últimas décadas.

Segundo Torregiani e Bertolo (2001), a associação de operações e processos adequados durante a fabricação de determinado alimento pode garantir a manutenção da qualidade no produto final.

Mas para Matos (2007), mesmo o processamento de frutas desidratadas agregando valor ao produto, só ter-se-á como resultado final frutas secas saudáveis e saborosas se forem utilizadas durante o processamento frutas de qualidade, pois a qualidade final do produto que será desidratado depende da matéria prima utilizada.

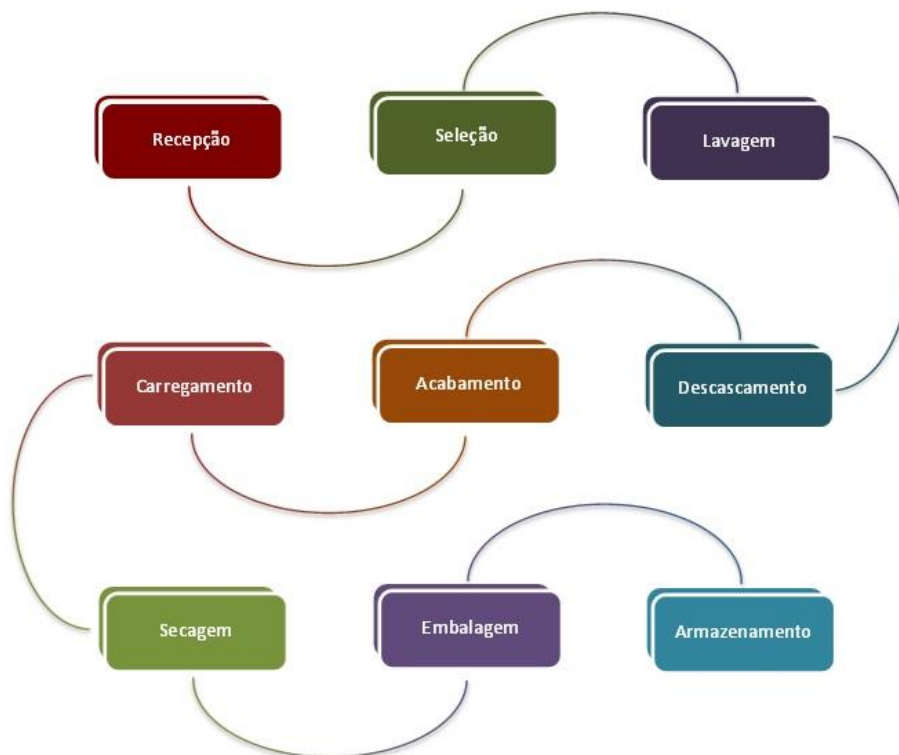
Para garantir qualidade e atender aos padrões que observem às normas de qualidade e higiene estabelecidas pela legislação, as frutas desidratadas, isto é, secas, são obtidas com frutas maduras, inteiras ou em pedaços e esse processo envolve tecnologias apropriadas, garantindo um produto saudável.

No que se refere ao processamento industrial, seja em grande ou pequena escala, há a necessidade que o desenvolvimento dessas tecnologias contribua para minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos pelo processamento, de forma a atender a crescente exigência por produtos de melhor qualidade por parte dos consumidores. Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato ou como ingredientes na formulação de diversos tipos de alimentos, tais como, em produtos de confeitaria, sorvetes, sobremesas, saladas de frutas e iogurte.

Em todos os casos é desejável que os ingredientes mantenham a cor, o aroma, e o sabor o mais próximo da fruta *in natura*, preferencialmente sem a utilização de aditivos, e proporcionando uma textura agradável ao alimento depois do processamento.

O processo de produção de frutas desidratadas pode seguir a sequência de etapas proposta na Figura 2.3, de modo que garanta a disponibilização de um produto de qualidade e que, atendendo às exigências legais, esteja pronto para a comercialização:

Figura 2.3 – Fluxograma para produção de frutas desidratadas.



Fonte: Adaptado de <<http://www.empregoerenda.com.br/ideias-de-negocios/cursos/158-frutas-desidratadas-uma-opcao-de-saude-e-renda>>.

2.3 Secadores de frutas

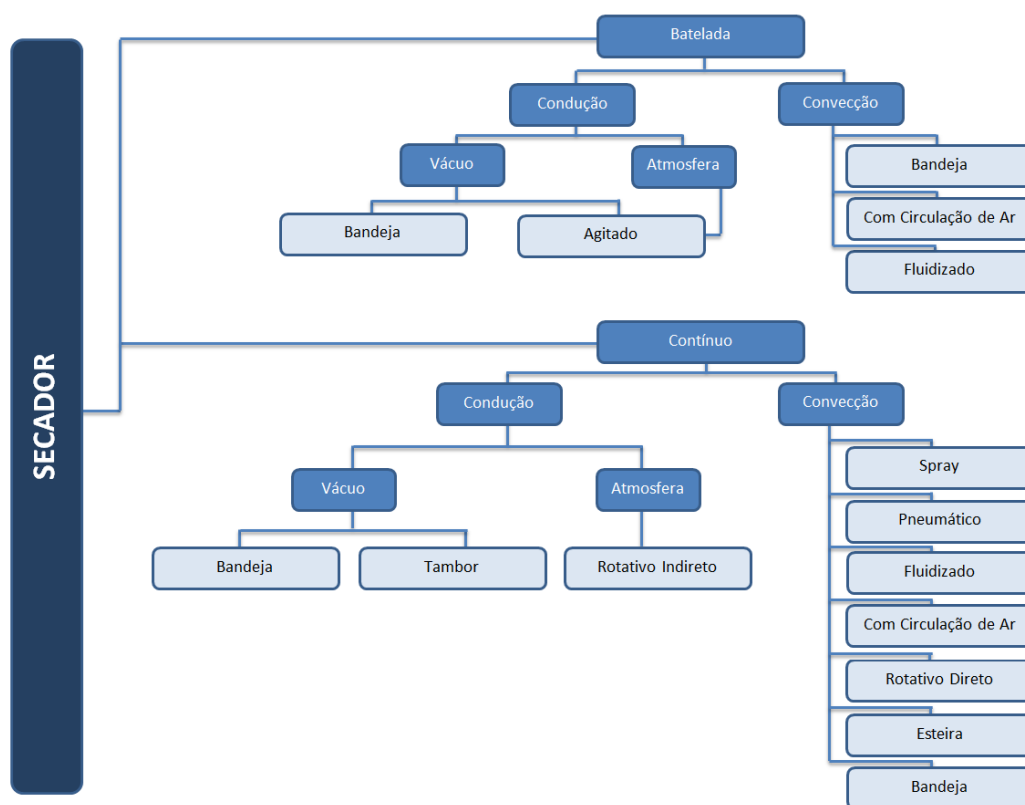
A grande variedade de equipamentos e processos de secagem representa uma das maiores dificuldades na seleção de secadores para se obter um produto de qualidade. Muitos métodos são apresentados na literatura para escolha do modelo mais adequado a cada necessidade, como os baseados em conceitos fenomenológicos e os que dizem respeito aos custos (Machado, 2009).

No entanto, dos muitos tipos de secadores para produtos agrícolas, os modelos diferem-se, basicamente, pelo método de operação (contínuo ou batelada), sendo, portanto, de extrema importância o conhecimento como interveem o produto no equipamento.

2.3.1 Tipos de secadores

Segundo Park *et al.* (2007), a classificação dos secadores pode ser obtida com base no método de operação, cujas peculiaridades apresentam-se conforme demonstrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Fluxograma de classificação dos secadores.



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2007).

- **Secadores de Batelada ou Descontínuos:** nos sistemas de secagem por batelada o produto é depositado no secador até que o processo seja concluído e, só então, o produto desidratado é removido e outra porção de produto é depositada, quando é iniciado um novo processo.
- **Secadores Contínuos:** consistem em equipamento de secagem nos quais os produtos a serem desidratados são depositados de forma que durante a realização do processo outros produtos são inseridos no sistema enquanto os que atingem o teor de umidade desejado são retirados, como o próprio nome sugere, continuamente.

Para Machado (2009), dentre os secadores que operam de forma descontínua, os secadores de cabine ou bandejas são mais comumente utilizados, sendo mais eficientes, mais econômicos, com custos de construção e de manutenção baixos.

Os secadores de cabine ou bandejas operam sob duas circunstâncias: a câmara do aquecedor é cheia e só será iniciado o movimentado do ar após a temperatura atingir o grau desejado; ou, o secador é posto em funcionamento só depois que a temperatura e a circulação de ar estiverem nas condições ideais, quando, então, será possível a introdução dos produtos no equipamento.

Muitas vezes, a distribuição de ar nos secadores de cabine não é inteiramente uniforme, o que consiste numa característica inconveniente, pois, por esta razão, o produto pode ser processado de forma desigual. Para se evitar este transtorno, deve-se constantemente mudar os vagonetes de lugar e de proceder à troca de posição das bandejas, o que se caracteriza como uma prática antifuncional (Gouveia *et al.*, 2003).

Um dos equipamentos mais versáteis para a secagem de alimentos é o secador de bandejas, onde o produto é disposto em bandejas e submetido a uma corrente de ar aquecido. Após seu surgimento no mercado, o secador de bandejas passou a ser utilizado por pequenas e médias indústrias de alimentos. A fonte de energia utilizada nesse tipo de secador, em geral, é a energia elétrica ou o gás liquefeito de petróleo (GLP).

Para Gouveia *et al.* (2003), com a disponibilização de mais equipamentos, com as características já citadas, no mercado de processamento de produtos agrícolas, certamente houve um aumento na implantação de indústrias de secagem, reduzindo-se as perdas do excedente da produção dos produtos agropecuários.

2.3.2 Secadores solares

A secagem utilizando energia solar em ambientes abertos, conhecida como secagem natural, secagem ao ar livre ou popularmente referida como secagem de terreiro ainda é muito usada para determinados produtos agrícolas. A secagem utilizando secador solar de exposição direta ou indireta tem crescido porque tem apresentado resultados positivos quanto ao processo de secagem além de garantir maior

qualidade e limpeza ao produto final desidratado. Esses secadores são mais utilizados na produção de passa de frutas em geral, principalmente banana e abacaxi.

Neste capítulo serão apresentadas algumas características construtivas e operacionais dos secadores de exposição direta e indireta. Os secadores solares de exposição indireta, em geral, representam uma evolução em relação aos primeiros, uma vez que neste, o ar ambiente que é o responsável direto pelo processo de secagem pode ser controlado em relação a suas propriedades termodinâmicas, principalmente em relação à temperatura, umidade e volume de ar que circula no interior da câmara de secagem.

2.3.3 Secador solar de exposição direta

O secador solar de exposição direta é um equipamento muito simples, de fácil construção, operação e manutenção, sendo composto basicamente de três elementos: o corpo, que é uma caixa retangular construída de madeira; duas bandejas, onde o abacaxi, ou outro produto agrícola é colocado para ser desidratado; e a cobertura do secador, que lhe dá a característica de estufa.

Na Figura 2.5 são mostrados dois protótipos de secador solar de exposição direta desenvolvidos na UFCG em Campina Grande por Nunes, Gomes e Grilo (2014) e que são largamente utilizados na desidratação de abacaxi. No secador existem duas aberturas que realizam um papel muito importante para o sucesso do processo de secagem. Estas duas aberturas são posicionadas com níveis diferentes: uma mais baixa, para entrada do ar frio e outra mais elevada, para saída do ar aquecido.

Figura 2.5 – Protótipos de secadores solares de exposição direta da UFCG.



Fonte: Próprio autor.

As principais características construtivas do secador solar individual de exposição direta desenvolvido por Nunes, Gomes e Grilo (2014), utilizado para secagem de abacaxi são:

- Pintura exterior; branco gelo / interior; alumínio – tinta Coralar;
- Base com bloco de compensado naval 10 mm e fundo de 6 mm, largura x comprimento x altura (460 x 700 x 200) mm, os blocos são aparelhados antes de serem pintados;
- Cobertura com vidro de 4 mm, largura x comprimento (440 x 660) mm com cantoneira de 3/4” x 1/16” e silicone para vedação e fixação do vidro na cantoneira e parafusos para fixação da cantoneira no bloco; ou cobertura de polycarbonato alveolar transparente, com as mesmas dimensões;
- 2 Bandejas por secador de madeira maciça aparelhada e pintada com tinta Coralar branca tendo largura x comprimento (380 x 600) mm com tela de nylon média;
- Entrada de ar frio de madeira maciça, cor verde folha Coralar com largura x altura (40 x 430) mm com tela de nylon fina e com porta de fechamento noturno pintado de verde folha.

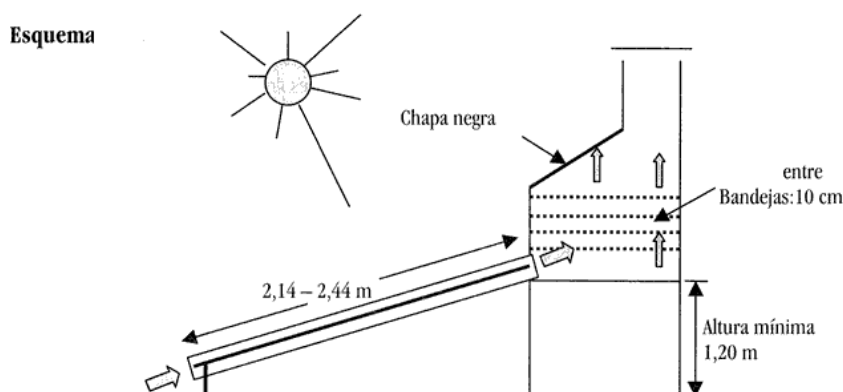
Nesta dissertação, os resultados obtidos no processo de secagem do abacaxi, com o secador de exposição indireta serão comparados com os obtidos no protótipo já referenciado, para se observar algumas vantagens e desvantagens inerentes a cada tipo de secador.

2.3.4 Secador solar de exposição indireta

Neste tipo de secador solar o produto a ser desidratado não está diretamente exposto à radiação solar, isso minimiza a descoloração e rachaduras na sua superfície. A câmara de secagem é utilizada para manter o produto na bandeja. Na Figura 2.6 é mostrado um esquema representativo de um secador solar indireto, com câmara de secagem, neste secador a radiação solar não é diretamente incidente sobre o material a

ser seco. O ar é aquecido em um coletor solar e, em seguida, conduzido para uma câmara de secagem onde se encontra o produto à ser desidratado.

Figura 2.6 – Representação de um sistema de secagem solar de exposição indireta.



Fonte: Grilo (2007).

Na Figura 2.7 é mostrado uma foto do protótipo de um secador híbrido desenvolvido por Nunes *et al.* (2013), onde o produto a ser desidratado era colocado em bandejas, em uma câmara de secagem. A energia solar foi utilizada para aquecer o ar que vai para câmara de secagem. Quando a energia solar não era suficiente ocorria um aquecimento adicional da câmara usando gás liquefeito de petróleo (GLP). A indicação para ativar o sistema auxiliar de GLP, para manter a temperatura no interior da câmara de secagem no valor apropriado, foi realizado por um sistema de monitoramento e aquisição de dados também desenvolvidos na UFCG.

Figura 2.7 – Protótipo de um secador híbrido de exposição indireta da UFCG.



Fonte: Nunes *et al.* (2013).

2.4 O sol como fonte de energia

Segundo Grilo (2007) é a partir do sol que as plantas e os animais se desenvolvem e são seus resíduos que geram as fontes não renováveis, como petróleo, carvão e gás natural. Assim, também, é a radiação solar que induz a movimentação do ar ambiente gerando os ventos que são usados na energia eólica e causa a evaporação das águas possibilitando a energia hidrelétrica, caracterizando-se, também, como origem das energias renováveis. Dessa forma, a energia solar é a origem de quase todas as outras fontes de energia.

Lima *et al.* (2006) citam alguns exemplos de fontes de energia que derivam da energia solar, como as hidrelétricas, que a utilizam na evaporação da água que causa as chuvas e enche as represas, para mover as pás dos moinhos e geradores elétricos.

O emprego de fontes não renováveis, como as baseadas em combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) intensificam os riscos ambientais, enquanto que a utilização de fontes renováveis (solar, eólica, hidráulica) amenizam esses danos.

Daí decorre, nos tempos modernos, a busca incansável por mecanismos de geração de energia à base de fontes alternativas que amenizem os impactos ambientais. Em muitas partes do mundo, há uma consciência crescente de que as energias renováveis têm um papel importante a desempenhar na extensão da tecnologia para o agricultor em países em desenvolvimento, aumentando sua produtividade (Waewsak, Chindaruxsa e Punlek, 2006).

Como exemplo de restrição ao uso de energia de origem fóssil no processamento de alimentos, por determinação do Conselho Nacional de Petróleo, em 1980 foi proibida a utilização de qualquer derivado do petróleo na secagem de cereais, madeira e fumo, forçando os setores de armazenamento e secagem de produtos agrícolas a encontrar alternativas energéticas que substituíssem os combustíveis fósseis (Silva, Donzelles e Corrêa, 2000).

Mesmo não sendo um tipo de energia massificada, devido à necessidade de um investimento inicial mais elevado, a energia solar representa uma das fontes mais limpas em relação ao impacto ambiental, o que deve ser considerado, no momento de escolha de investimentos neste setor.

As formas mais usuais de utilização tecnológica da energia solar, atualmente, são através da:

- **Arquitetura bioclimática:** as construções que são projetadas dentro do conceito de aproveitamento das condições ambientais locais economizam energia e água privilegiando a ventilação e a iluminação natural e o aproveitamento da água de chuva. É a chamada arquitetura verde que é cada vez mais utilizada por arquitetos e engenheiros.
- **Energia solar fototérmica:** é a utilização da energia proveniente do sol como fonte de aquecimento de fluidos em geral, principalmente aquecimento de água para substituição do chuveiro elétrico e o aquecimento do ar ambiente usado nos processos de secagem de produtos agrícolas.
- **Energia solar fotovoltaica:** é a conversão direta de energia solar em energia elétrica através da radiação incidente em painéis fotovoltaicos. Essa é a utilização mais nobre da energia solar, mas que ainda demanda um investimento inicial mais elevado comparativamente a outros processos de geração de eletricidade.

Partindo deste princípio, observa-se a busca por mecanismos de captação e conversão direta da energia solar, a fim de ser viabilizada sua aplicação nas necessidades humanas.

Em meio às diferentes formas de aproveitamento dessa energia, pode-se destacar o aproveitamento térmico e a transformação direta em energia elétrica como formas básicas que podem ser aplicadas nos procedimentos de secagem de alimentos.

2.4.1 Energia solar fototérmica

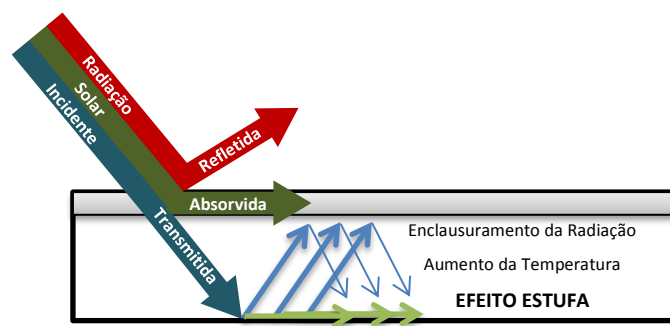
Essa forma térmica de aproveitar o potencial energético do sol ocorre devido à absorção da radiação solar que chega à superfície terrestre com o uso de coletores solares ou de concentradores solares.

Ao ser emitida pelo sol, a radiação solar se propaga na forma de radiação eletromagnética com qualidade espectral em várias faixas de comprimento de onda. A

radiação solar que chega a superfície da terra, ao nível do solo, tem comprimento de onda na faixa de 0,10 a 2,50 micrômetros, ou seja, é predominantemente radiação ultravioleta, radiação visível e radiação infravermelha (Grilo, 2007).

Essa radiação ao incidir sobre o coletor de energia solar atravessa a cobertura transparente sendo absorvida no interior do coletor solar, tendo como consequência o aumento da temperatura no interior do mesmo. Esse fenômeno conhecido como efeito estufa é o princípio de funcionamento dos sistemas de aquecimento que utilizam energia solar fototérmica. Na Figura 2.8 é mostrado um esquema de funcionamento do efeito estufa a partir da energia solar.

Figura 2.8 – Representação esquemática do efeito estufa.



Fonte: Próprio autor.

A energia obtida por meio de coletores solares é utilizada para o aquecimento de água ou ar, a temperaturas relativamente baixas com a finalidade de suprir, principalmente, as necessidades residenciais. No entanto, o uso desse mecanismo nos setores industriais está tendo uma demanda cada vez maior.

Para aproveitar a energia solar a temperaturas mais elevadas faz-se necessário a utilização de concentradores solares, cujo princípio de funcionamento é a convergência da radiação solar, por meio de superfícies refletoras, de uma grande área para uma área muito menor, aumentando a temperatura incidente nessa área final.

2.4.2 Energia solar fotovoltaica

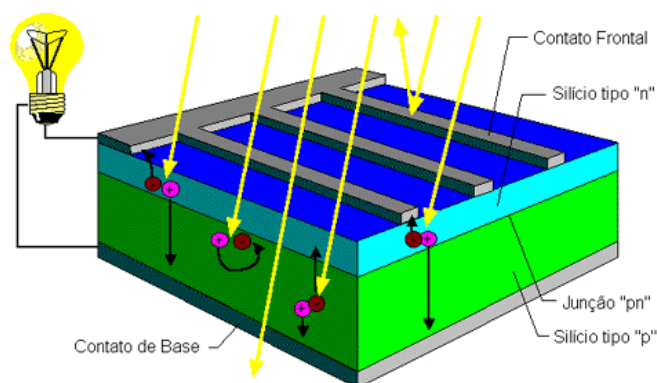
Segundo Braga (2008), a primeira vez que foi verificada a conversão direta de luz em energia elétrica foi em 1839, pelo físico Edmond Becquerel, onde se observou que, quando exposto à luz, ocorria uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor.

Com o advento dos programas espaciais, os investimentos em sistemas fotovoltaicos impulsionaram essa tecnologia e, associado à crise mundial de energia, possibilitou a utilização deste mecanismo não apenas para os programas espaciais, mas para suprir o fornecimento energético no meio terrestre.

Os módulos fotovoltaicos consistem na interligação de células solares que, por sua vez, são compostas de uma fina camada de silício tipo N (material resultado do acréscimo de fósforo ao cristal de silício puro) e outra mais espessa de silício tipo P (silício puro acrescido de boro), que separadamente são eletricamente neutras, mas juntas geram um campo elétrico.

Ao incidirem sobre as células fotovoltaicas, os fótons que integram a luz solar se chocam com os elétrons do silício energizando-os e transformando-os em condutores. Por meio de outro condutor externo à célula, conecta-se a camada negativa à positiva, gerando-se, assim, um fluxo de elétrons na conexão, ou seja, uma corrente elétrica, como é possível observar na representação esquemática mostrada na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Representação esquemática de uma célula fotovoltaica.



Fonte: <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>.

Como a tecnologia utilizada para fabricação de módulos fotovoltaicos demanda investimentos elevados, a utilização dessa forma de energia ainda está avançando lentamente.

No entanto, com a disseminação dessa tecnologia, novas empresas estão investindo no setor e os custos para implantação dos sistemas interligados na rede começam a ganhar aceitabilidade comercial. Outro ponto a destacar, são as configurações desses sistemas com a retirada de elementos de armazenamento da energia excedente, o que também tem contribuído na diminuição dos preços de sistemas fotovoltaicos mais simples.

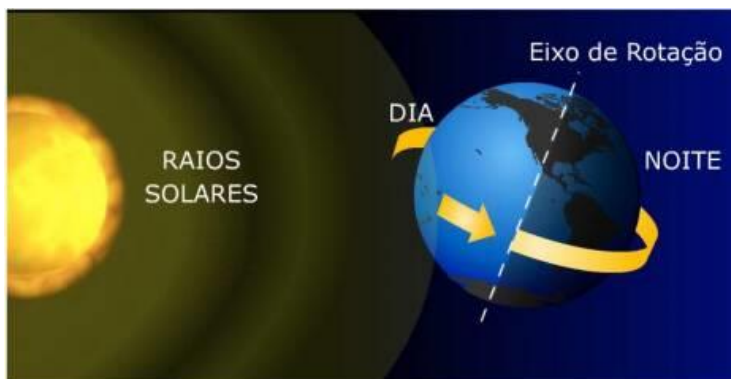
2.4.3 Movimento aparente do sol

A fim de se obter um melhor aproveitamento da radiação solar, os coletores solares devem ser posicionados de forma que a incidência da radiação ocorra o mais perpendicularmente possível ao plano da superfície coletora.

Desse modo, necessita-se observar a movimentação relativa do sol em relação a um observador na terra. O movimento de translação e de rotação da Terra em relação ao sol são determinantes para estabelecer o melhor posicionamento dos sistemas de aquecimento solar na superfície terrestre.

O movimento da Terra em torno de um eixo imaginário que passa pelo seu próprio centro é denominado de rotação, tem duração de 24 (vinte e quatro) horas e é responsável pela divisão do tempo em dia e noite, como mostrado na representação esquemática da Figura 2.10.

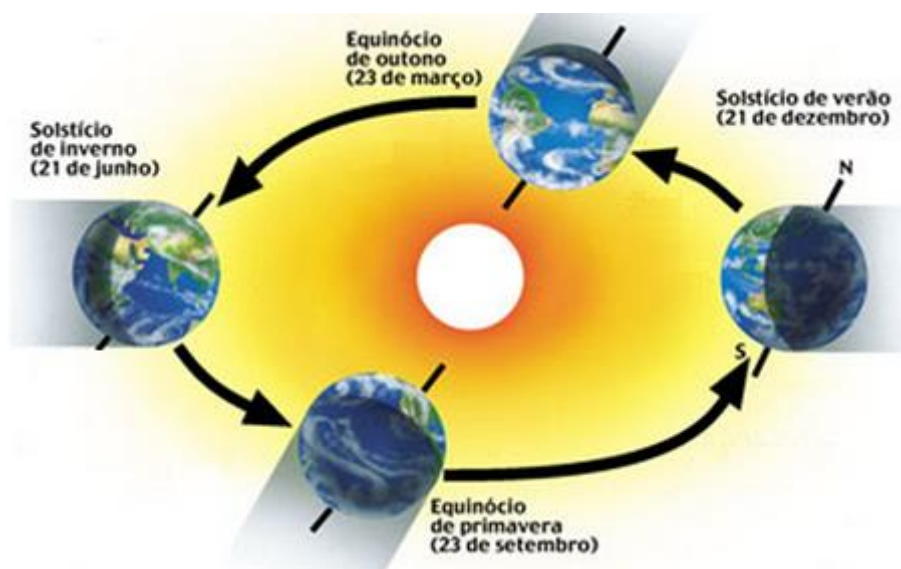
Figura 2.10 – Representação do movimento de rotação da Terra



Fonte: http://www.escolamaxima.com.br/universomx/hmpgs/joaopa_luis/rotacao.htm.

Já o movimento de translação da Terra em torno do sol dura, aproximadamente, 365 (trezentos e sessenta e cinco) dias e determina a divisão do ano em estações; outono, inverno, primavera e verão, como mostrado na representação esquemática da Figura 2.11. Por isto, a quantidade e o ângulo de incidência da radiação solar sobre a superfície terrestre, para uma determinada localidade, variam ao longo do ano.

Figura 2.11 – Representação do movimento da Terra em torno do sol.



Fonte: <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Universo/sistemasolar2.php>.

Segundo Grilo (2007), no dia 23 de março inicia-se a primavera no hemisfério Norte e o outono no hemisfério Sul. Em seguida, no dia 21 de junho, ocorre o início do verão no hemisfério Norte e do inverno no hemisfério Sul. Em setembro, dia 23, têm-se o início do outono no hemisfério Norte e da primavera no hemisfério Sul. Por fim, dia 21 de dezembro, acontece o início do inverno no hemisfério Norte e do verão no hemisfério Sul.

Ainda segundo Grilo (2007), outra particularidade em relação aos movimentos terrestres diz respeito ao eixo de rotação terrestre, que tem uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação à linha imaginária do Equador. Logo, durante o movimento de translação da terra em torno do sol o eixo de rotação da terra varia de $-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$, o que se denomina de declinação solar da terra.

Em razão do movimento de translação e da declinação solar da Terra, cada hemisfério fica, alternadamente, mais exposto aos raios solares durante um período do

ano. Nos meses de dezembro a março, o hemisfério Sul fica mais exposto ao sol. É quando os raios solares incidem perpendicularmente sobre pelo menos alguns pontos do hemisfério Sul. É verão nesse hemisfério.

Para localidades posicionadas no hemisfério sul, caso da cidade de Campina Grande-PB, uma superfície heliostática deveria se movimentar continuamente para receber a incidência da radiação solar perpendicular a sua superfície. Isto demandaria um investimento elevado. O que geralmente se faz é posicionar a superfície coletora de energia solar voltada para o norte geográfico na posição de receber a radiação solar com melhor ângulo de incidência no período de inverno, quando a demanda energética é maior. Por isso, os coletores de energia solar nas cidades de Patos-PB e Campina Grande-PB são voltados para o Norte com um ângulo de aproximadamente 17° a 22° que corresponde à soma da latitude do local (7° sul) mais um ângulo de 10° ou 15° .

Capítulo III
MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades foram realizadas no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em Campina Grande, PB, mostrado na Figura 3.1. O laboratório possui um *solarium*, que é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.1 – Laboratório experimental de máquinas térmicas, UFCG.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.2 – *Solarium* do LEMT, UFCG.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Metodologia

Foram realizados diversos testes experimentais. Dentre os resultados obtidos, foram escolhidos cinco experimentos, relatados como Experimento 1 (E1), Experimento

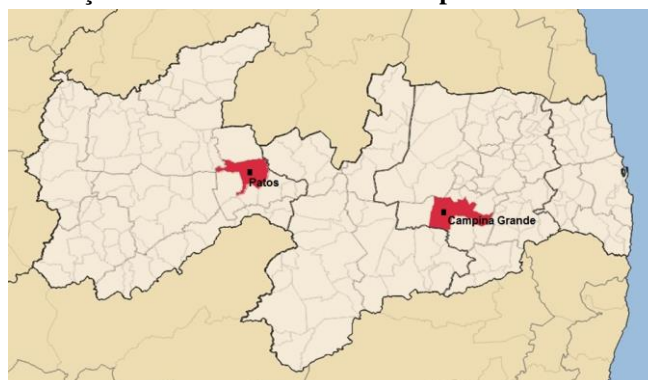
2 (E2), Experimento 3 (E3), Experimento 4 (E4) e Experimento 5 (E5), que foram realizados nos dias:

- E1 – dias 15 e 16 de novembro de 2014;
- E2 – dias 27 e 28 de novembro de 2014;
- E3 – dias 09 e 10 de dezembro de 2014;
- E4 – dias 12 e 13 de dezembro de 2014;
- E5 – dias 21 e 22 de dezembro de 2014.

Os dados coletados na realização de cada um desses experimentos podem ser visualizados nas Tabelas B.1, B.2, B.3, B.4 e B.5, no Apêndice B. Em cada teste experimental são avaliadas as condições necessárias para efetivação do processo de secagem, capaz de produzir um produto final de qualidade.

A montagem do protótipo e os testes experimentais preliminares ocorreram no LEMT em Campina Grande (latitude 7° Sul e longitude 36° Oeste). Enquanto os cinco testes experimentais usados na obtenção dos dados principais foram realizadas na cidade de Patos-PB (latitude 7° Sul e longitude 37° Oeste), que fica a cerca de 180 km de Campina Grande-PB, Figura 3.3.

Figura 3.3 – Localização das cidades de Patos e Campina Grande no mapa da Paraíba.



Fonte: Próprio autor.

Na construção do protótipo do sistema de secagem foram utilizadas técnicas de carpintaria de fácil domínio, além de matérias-primas facilmente encontradas na região, que pudessem atender ao objetivo de desenvolver um equipamento de baixo custo, capaz de promover a desidratação de frutas.

Os frutos utilizados durante a realização dos testes foram adquiridos no comércio local, junto a pequenos produtores da região, nas feiras livres da cidade, estando ausentes de danos físicos e/ou deterioração provenientes de insetos e em perfeito estado de maturação.

A metodologia adotada foi a análise experimental, observando-se empiricamente as influências sofridas no desempenho do equipamento em função das variáveis climáticas e ambientais, principalmente: temperatura do ar ambiente nas diversas posições de interesse no sistema de secagem e a intensidade da radiação solar incidente e suas respectivas variações ao longo do dia.

As medições sempre eram iniciadas às 07 horas da manhã e concluídas às 17 horas da tarde, durante dois dias. No período entre 17 h da tarde do primeiro dia e 7 h da manhã do segundo dia, o abacaxi era guardado adequadamente em sacos com fechamento herméticos, Figura 3.4, a fim de evitar a reidratação do produto quando não estivesse submetido ao processo de secagem.

Figura 3.4 – Abacaxi armazenado em sacos com fechamento hermético.

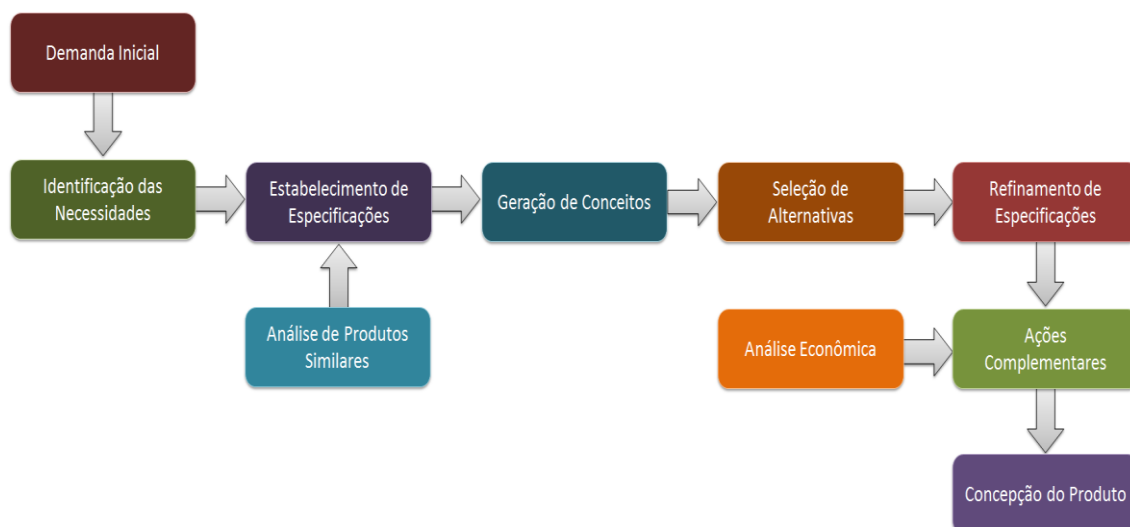


Fonte: Próprio autor.

3.2 Desenvolvimento do secador solar

A concepção de uma máquina compreende uma sequência de etapas que, se observadas, culmina-se na obtenção de um equipamento otimizado. Na Figura 3.5, são apresentadas as mais importantes etapas do processo de desenvolvimento do sistema de secagem objeto desse trabalho.

Figura 3.5 – Etapas do processo de desenvolvimento de produto.



Fonte: Adaptado de Ulrich e Eppinger (2000).

Sabe-se que grande quantidade da produção de frutas é desperdiçada antes de chegar à mesa do consumidor, afetando a quantidade e/ou a qualidade dos alimentos ofertados à população.

As perdas do abacaxi comercializado *in natura* decorrem, dentre outros fatores, do elevado teor de umidade presente no abacaxi, que faz com que o tempo de prateleira desse produto seja pequeno. Segundo Gomes, Nunes e Grilo (2014b), esse tempo é em torno de duas semanas. Daí a necessidade da concepção de um equipamento que permitisse a conservação das frutas por um período maior do que os disponíveis para condições naturais.

A secagem, ou desidratação, é uma das alternativas mais antigas para conservação de alimentos. Logo, determinou-se que o equipamento a ser desenvolvido fosse um secador de frutas. E dentre os secadores já desenvolvidos e descritos na literatura, o secador de exposição indireta favorece ao processamento do abacaxi, já que não há necessidade de elevadas temperaturas durante o processo de secagem, para não promover a caramelização do produto.

Como os secadores indiretos consistem numa fonte de calor acoplada a uma câmara de secagem, chegou-se aos conceitos de um secador onde seus componentes fossem unidos por meio de dutos termicamente isolados ou diretamente interligados.

A alternativa encontrada para geração do calor necessário ao processo de secagem e que esteja associada ao conceito de desenvolvimento sustentável foi do aproveitamento da energia solar fototérmica.

Desse modo, pensou-se em desenvolver um secador solar de frutas constituído de um coletor solar plano e uma câmara de secagem, construído em MDF Ultra, com o uso de policarbonato como superfície transparente para captação da radiação solar incidente.

Para testes preliminares, foi construído um protótipo de secador solar, cujo acoplamento entre o coletor solar e a câmara de secagem ocorria através de dutos termicamente isolados, conforme mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Secador solar acoplado por dutos.



Fonte: Próprio autor.

Durante os testes experimentais preliminares foram observados problemas na ligação entre o coletor solar e a câmara de secagem. Estava ocorrendo o enclausuramento do ar no coletor solar, sendo necessária, a utilização de um sistema de movimentação do fluido de trabalho para a câmara de secagem. A passagem do ar quente do coletor solar para a câmara de secagem foi obtida com a utilização de um sistema de exaustão através de ventiladores (*coolers* usados nos gabinetes de computador desktop) acionados por um painel de energia solar fotovoltaica, sendo, também, o coletor solar diretamente acoplado à câmara de secagem sem a necessidade dos dutos.

Inicialmente foi confeccionado um protótipo feito de isopor, em escala real, mostrado na Figura 3.7, com o objetivo de verificar a operacionalidade do sistema em desenvolvimento.

Figura 3.7 – Protótipo preliminar de isopor do secador solar de frutas.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 3.8 é mostrado o sistema de exaustão que utiliza energia solar fotovoltaica como fonte de energia para *coolers* de computador a fim de promover uma melhor circulação do ar de secagem.

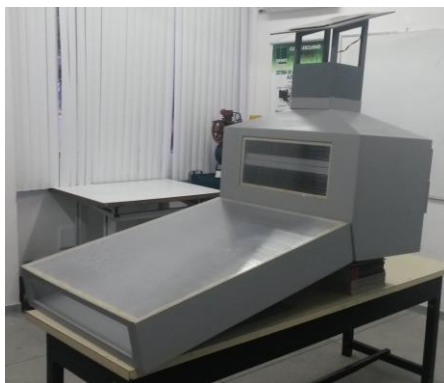
Figura 3.8 – Sistema de exaustão para secador solar de frutas.



Fonte: Próprio autor.

Essas escolhas conduziram ao desenvolvimento de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético, cujo protótipo final é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Secador solar de frutas com aproveitamento multienergético.



Fonte: Próprio autor.

Com a escolha desse modelo pretende-se ter um maior controle na qualidade das características termodinâmicas do ar de secagem visando a obtenção de uma curva de secagem mais homogênea e consequentemente um produto final de maior qualidade.

3.2.1 Materiais utilizados

Para desenvolver um equipamento que agregasse elevada eficiência energética e baixo custo, mas que pudesse ter sua tecnologia assimilada pelos pequenos produtores da região, permitindo-os desenvolver seus próprios equipamentos, os materiais utilizados para construção do coletor solar e da câmara de secagem foram selecionados de maneira a atender esses requisitos básicos.

Dessa forma, foram utilizados materiais facilmente encontrados no comércio local, tais como:

- **Painel de fibras de média densidade conhecido comercialmente como MDF (*Medium Density Fiberboard*):** material fabricado com fibras de madeiras selecionadas de pinus ou eucalipto de reflorestamento, aglutinadas com resina sintética termofixa, sob a ação conjunta de calor e pressão. Aplicado em toda a estrutura do secador solar. O MDF Ultra apresenta dupla proteção contra umidade e cupins, o que lhe garante um prolongamento de vida útil, principalmente quando o equipamento está exposto as ações de intempéries;
- **Policarbonato alveolar:** material elaborado à base de resina, que oferece transmissividade elevada à radiação solar incidente e alto nível de segurança. Foi utilizado como cobertura transparente para captação da luz solar no coletor solar e como janela de observação na câmara de secagem, permitindo a obtenção do efeito estufa e facilitador da visualização do processo de secagem;
- **Velcro:** dispositivo de fixação composto por duas tiras de tecido composta de ganchos e loops. Empregado para conectar o policarbonato ao MDF, bem como, na fixação de MDF com MDF. O velcro permite o desmonte de alguns

componentes removíveis, o que facilita a locomoção e limpeza do equipamento;

- **Tela de nylon:** material de fibra têxtil sintética que apresenta ótima resistência ao desgaste e à tração. Usada nas bandejas onde se deposita o material a ser desidratado. A tela de nylon permite a circulação do ar no interior da câmara e apresenta facilidade para limpeza de resíduos das frutas;
- **Alumínio:** placa fabricada de alumínio com espessura de 2 mm. Utilizado como refletor e absorvedor de calor no interior do coletor solar, o alumínio apresenta elevada capacidade condutiva, o que facilita o processo de transferência de calor ao ar de secagem.

Além desses, ainda foram utilizados na construção do equipamento de secagem alguns componentes eletrônicos, que viabilizaram o sistema de exaustão do ar de secagem, tais como:

- **Coolers:** ventoinha, equipamento largamente empregado no sistema de resfriamento do interior dos gabinetes de computadores desktop. No sistema de secagem o cooler foi utilizado para forçar a circulação de ar para o interior da câmara de secagem, seu acionamento ocorre através do uso da energia solar fotovoltaica;
- **Mini painel solar fotovoltaico:** módulo de conversão direta da energia solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, utilizado para fornecimento de eletricidade aos *coolers*.

3.2.2 Dimensionamento

Na Tabela 3.1 são apresentadas as principais características do sistema de secagem desenvolvido. Observa-se que o volume da câmara de secagem tem aproximadamente, duas vezes o volume do coletor solar. As aberturas de passagem do ar de secagem vão se estreitando da entrada do coletor solar até a saída da câmara de secagem.

Tabela 3.1 – Grandezas de alguns componentes do secador desenvolvido.

Componente	Observação	Volume	Área
		[l]	[m ²]
Coletor Solar	Interior	120	---
Câmara de Secagem	Interior	200	---
	Tampa	24	
Entrada do Ar Frio	Interna	---	0,08
Saída do Ar Quente	Interna	---	0,04
Superfície Transparente	---	---	0,8

Fonte: Próprio autor.

No Apêndice A estão mostradas, nos respectivos desenhos técnicos, as dimensões características de cada componente do secador solar e as especificações dos materiais utilizados, bem como, a forma de construção de cada elemento.

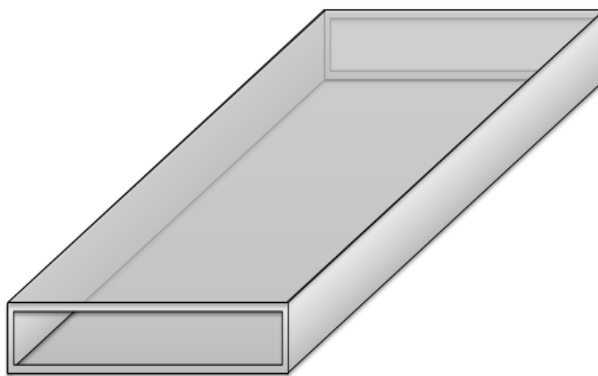
3.2.3 Coletor solar

O coletor solar consiste no equipamento responsável pelo aquecimento do ar ambiente que vai ser utilizado para retirar água do produto a ser desidratado. O princípio de funcionamento do coletor solar é baseado no equivalente ao efeito estufa, onde a radiação solar incidente na cobertura do coletor é transferida para o interior do secador devido a elevada transmissividade do material da cobertura, geralmente feita de vidro ou de policarbonato.

O aumento da temperatura no interior do secador é obtido devido ao efeito estufa, tendo como consequência o aumento da temperatura do ar ambiente que passa pelo secador. Trata-se da conversão da radiação eletromagnética proveniente da energia solar em energia térmica do ar ambiente.

Na Figura 3.10 é mostrado um desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.

Figura 3.10 – Desenho esquemático do coletor solar desenvolvido.



Fotos: Próprio autor.

a) Posicionamento

Segundo Grilo (2007), para um coletor solar fixo, localizado no hemisfério Sul, obter uma melhor captação da radiação solar incidente ao longo do ano, recomenda-se que ele esteja posicionado voltado para o norte geográfico, com uma inclinação igual à latitude local mais uma inclinação de 10° a 15° . Isso garante uma melhor eficiência energética do equipamento durante o inverno, ou seja, entre junho e setembro.

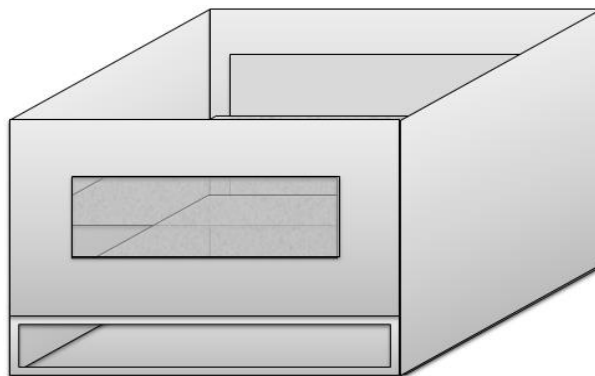
Para as cidades de Campina Grande-PB e Patos-PB, ambas com latitude média local de 7° Sul, recomenda-se inclinação do coletor entre 17° e 22° voltado para o Norte. No presente estudo, foi utilizada uma inclinação de 17° .

3.2.4 Câmara de secagem

A câmara de secagem é o componente do secador solar onde o produto a ser desidratado é colocado a fim de receber a ação do ar de secagem, promovendo, assim, as trocas de calor e massa necessárias ao processo de desidratação.

No equipamento desenvolvido, a câmara de secagem, mostrada de forma esquemática na Figura 3.11, tem no seu interior os compartimentos onde se encontram duas bandejas para colocação as frutas.

Figura 3.11 – Desenho esquemático da câmara de secagem desenvolvida.



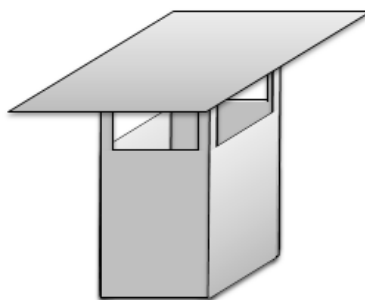
Fotos: Próprio autor.

3.2.5 Chaminé

A chaminé consiste num dispositivo de exaustão onde é promovida a retirada forçada do ar de secagem, por meio da utilização de *coolers* de computador acionado por um painel fotovoltaico.

Na Figura 3.12 é mostrado um desenho esquemático do elemento desenvolvido.

Figura 3.12 – Desenho esquemático da chaminé desenvolvida.



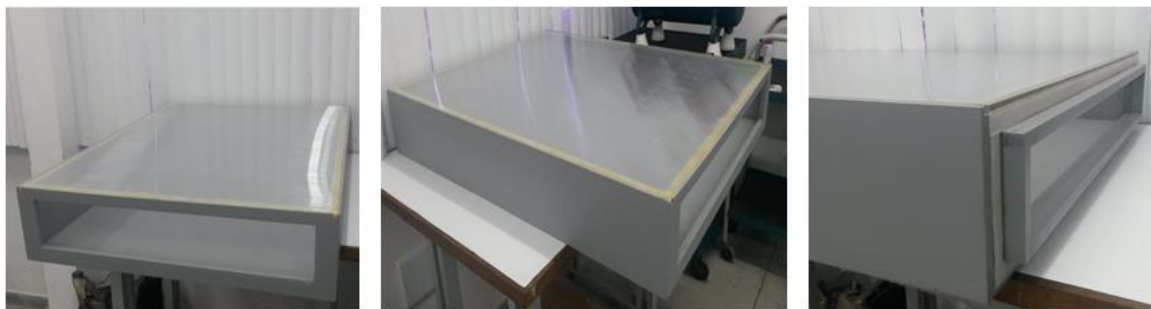
Fotos: Próprio autor.

3.3 Características construtivas do protótipo desenvolvido

O coletor solar desenvolvido, Figura 3.13, é composto por blocos de MDF, que formam uma caixa sem a parte superior. Na cobertura foi utilizado o policarbonato

alveolar cristal de elevada transmissividade. No bloco frontal tem uma abertura para entrada do ar ambiente frio e no bloco posterior tem uma abertura para saída do ar já aquecido, com um direcionador pro ar que segue em direção à câmara de secagem.

Figura 3.13 – Detalhes do coletor solar desenvolvido.



Fotos: Próprio autor.

Na câmara de secagem, constituída de uma caixa de MDF, conforme se observa na Figura 3.14, estão presentes duas aberturas na parte frontal (entrada do ar aquecido vindo do coletor solar e janela de observação), duas na parte posterior (entrada das bandejas) e uma na parte superior onde é acoplada uma tampa em formato de tronco de pirâmide com o componente de exaustão.

Figura 3.14 – Detalhes da câmara de secagem desenvolvida.



Fotos: Próprio autor.

A chaminé desenvolvida é mostrada na Figura 3.15. Na sua estrutura, toda em MDF, estão presentes uma tubulação de secção quadrada, com aberturas nos quatro lados da posição superior (saídas de ar – frontal, posterior, lateral direita e lateral esquerda) e uma abertura no lado inferior (entrada do ar), além de uma plataforma na parte superior, onde é colocado o mini painel solar fotovoltaico para acionamento dos *coolers*.

Figura 3.15 – Detalhes da chaminé desenvolvida.



Fotos: Próprio autor.

3.4 Avaliação de desempenho

O desempenho do sistema de secagem proposto deve avaliar duas características: o equipamento propriamente dito e o processo ao qual se destina. Pois se trata de um equipamento térmico destinado a promover a desidratação de produtos agrícolas.

Segundo Barbosa (2011), a eficiência do secador solar está relacionada com seu rendimento térmico, enquanto que a eficiência do processo de secagem pode ser avaliada pela diferença entre a massa inicial e a massa final do abacaxi, em relação à massa inicial de água presente no produto.

3.4.1 Rendimento térmico do equipamento

A partir do conceito básico de rendimento termodinâmico, como sendo a razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível ao mesmo, Guerra e Varela (2014) afirmam que o rendimento de um secador solar pode ser determinado pela Equação 3.1.

$$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot I} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde,

η_t = rendimento do secador solar [%];

P_u = potência transferida ao fluido de trabalho [W];

A_1 = área de cobertura transparente [m²];

I = radiação solar incidente [W/m²].

A potência transferida ao fluido de trabalho, também chamada de potência útil, é determinada pela Equação 3.2, e representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho, neste caso, o ar ambiente:

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Onde,

\dot{m} = vazão mássica do fluido de trabalho [kg/s];

c_p = calor específico do fluido de trabalho [J/kg.K];

ΔT = variação de temperatura [K].

Dessa forma, o rendimento térmico de um secador solar é expresso em função da potência útil, da radiação solar incidente, da área de cobertura transparente e, conseqüentemente, da vazão do fluido de trabalho, do calor específico do mesmo e da variação de temperatura obtida.

Para determinação da radiação solar incidente, foram adotadas duas metodologias. Nos testes realizados em Campina Grande-PB o LEMT dispõe de uma estação meteorológica com um piranômetro e nos testes realizados na cidade de Patos-PB os dados utilizados são os disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)² para radiação solar através do seu portal na internet. Sendo, a radiação solar média, calculada como determina a Equação 3.3.

$$\overline{Rad} = \frac{\sum Rad}{n} \quad (3.3)$$

Onde,

² Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que fornece informações meteorológicas à sociedade brasileira através das suas estações meteorológicas distribuídas pelo país, cujos dados estão disponíveis em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

\overline{Rad} = radiação solar média [W/m²];

Rad = radiação solar verificada [Wh/m²];

n = número de verificações [h].

A vazão mássica foi obtida através da medição da velocidade do ar que passa através da seção da chaminé, verificada por meio de um anemômetro digital portátil, mostrado na Figura 3.16, modelo VEC-GM 8901, marca Vectus, sendo calculada pela Equação 3.4.

$$\dot{m} = v_{ar} \cdot A_2 \cdot \rho \quad (3.4)$$

Onde,

v_{ar} = velocidade do ar [m/s];

A_2 = área da seção transversal da chaminé [m²];

ρ = massa específica do ar [kg/m³].

Figura 3.16 – Anemômetro digital (modelo VEC-GM 8901 – Vectus).



Fonte: Site do fabricante - <http://www.vectus.com.br/>

A variação de temperatura nos diversos pontos de interesse, dado pela Equação 3.5, foram medidas com um multímetro digital portátil, mostrado na Figura 3.17, modelo ET 1400, marca Minipa, com a utilização de termopares tipo K, em intervalos regulares a cada 01 (uma) hora.

$$\Delta T = T_{t+\Delta t} - T_t \quad (3.5)$$

Onde,

$T_{t+\Delta t}$ = Temperatura num instante $t + \Delta t$ [K];

T_t = Temperatura num instante t [K].

Figura 3.17 – Multímetro digital (modelo ET 1400 - Minipa)



Fonte: Site do fabricante - <http://www.minipa.com.br/>

3.4.2 Eficiência do processo de secagem

A eficiência do processo de secagem foi avaliada através da medição da variação das massas do produto a ser seco, através da Equação 3.6, que apresenta os parâmetros necessários a essa determinação.

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{\text{água}}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde,

η_p = eficiência do processo [%];

$m_{inicial}$ = massa inicial do produto [kg];

m_{final} = massa final do produto [kg];

$m_{\text{água}}$ = massa inicial de água presente no produto a ser secado [kg].

3.5 Determinação das curvas de secagem

Para obtenção das curvas experimentais de secagem em cada experimento foram calculadas a Razão de Umidade, através da Equação 3.7, plotada em gráfico em função do tempo de secagem.

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.7)$$

Onde,

RU = razão de umidade, base seca;

X = teor de umidade, base seca;

X_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca;

X_0 = teor de umidade inicial, base seca.

Os dados experimentais referentes à variação da massa do produto durante o processo de secagem, em intervalos regulares de 01 (uma) hora, foram obtidos com o uso de uma balança digital, mostrada na Figura 3.18, modelo KC 01, marca Western.

Figura 3.18 – Balança digital (modelo KC 01 – Western).



Fonte: Site do fabricante - <http://western.etilux.com.br/>

A avaliação do processo de secagem foi obtida comparando-se os valores experimentais com os modelos matemáticos descritos na literatura. Com a coleta de dados realizada, os parâmetros necessários à determinação das curvas de secagem (razão de umidade e tempo) foram calculados por meio do *software Microsoft Excel* versão 2010 e ajustados aos modelos matemáticos de Lewis e Page, dados pelas

Equações 3.8 e 3.9, mostrados na Tabela 3.2, utilizando-se o programa computacional *Statistica* versão 7.0, onde se determinam os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para verificar a predição do processo.

Tabela 3.2 – Modelos matemáticos empregados para ajustes das curvas de secagem.

Modelo	Equação	Nº	Referência
Lewis	$RU = \exp(-K \cdot t)$	(3.8)	Orikasa <i>et al.</i> (2008)
Page	$RU = \exp(-K \cdot t^n)$	(3.9)	Oliveira, Oliveira e Park (2006)

Fonte: Próprio autor.

Onde,

K = constante de secagem [min^{-1}];

n = parâmetro do modelo;

t = tempo de secagem [min].

Capítulo IV
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes experimentais realizados nos dias 15 e 16 de novembro de 2014 (E1), 27 e 28 de novembro de 2014 (E2), 09 e 10 de dezembro de 2014 (E3), 12 e 13 de dezembro de 2014 (E4) e 21 e 22 de dezembro de 2014 (E5).

Em cada experimento foram medidas as seguintes propriedades:

- Massa de abacaxi na câmara de secagem;
- Temperatura do ar ambiente (T_{amb});
- Temperatura do ar na entrada do coletor solar (T_{ent_col});
- Temperatura do ar no interior do coletor solar (T_{int_col});
- Temperatura do ar na junção do coletor solar com a câmara de secagem ($T_{col/cam}$);
- Temperatura do ar na saída da câmara de secagem (T_{sai_cam}).

No final de cada teste experimental, era observado o aspecto visual e realizada a degustação do produto final obtido. Na Figura 4.1 é apresentada uma foto do abacaxi já desidratado obtido em E1.

Figura 4.1 – Abacaxi já desidratado obtido em E1.



Fonte: Próprio autor.

Para cada um dos cinco testes experimentais analisados, os valores obtidos para variação da massa do abacaxi e para variação da temperatura do ar, medidos a cada hora são apresentados em tabelas do Apêndice B. Na sequência, a partir desses valores

obtidos, são calculados e apresentados os demais parâmetros necessários à construção das respectivas curvas de secagem e do cálculo do rendimento térmico do equipamento solar e da eficiência do processo de secagem.

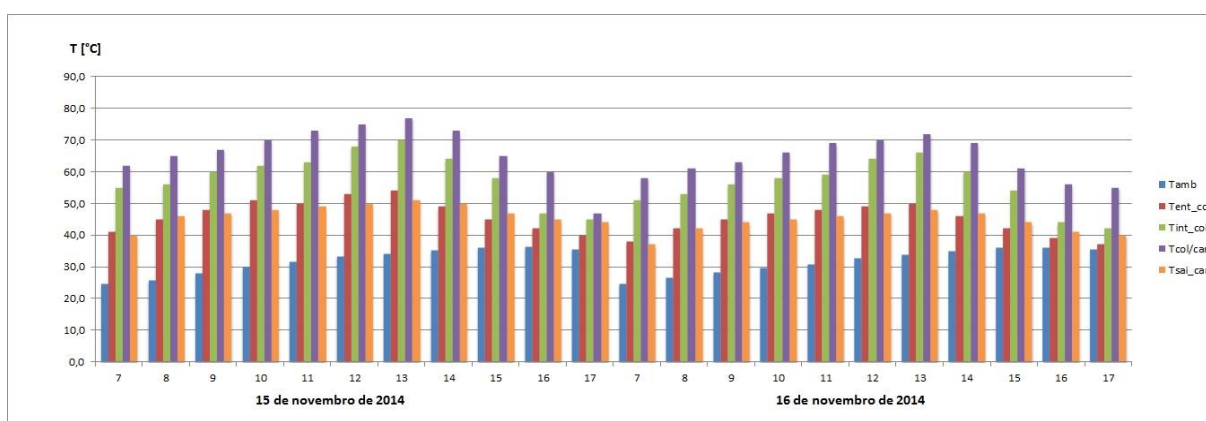
4.1 Análise dos testes experimentais

4.1.1 Teste E1, realizado nos dias 15 e 16 de novembro de 2014.

Para realização de cada experimento, o abacaxi passou pelas etapas de lavagem, descascamento e corte em rodela, com a retirada do núcleo central, conhecido comercialmente como talo, antes de serem posicionados nas bandejas do equipamento.

Na Figura 4.2 podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, em E1, valores esses que normalmente são conseguidos com uso intensivo de energia elétrica nos secadores de fruta atualmente em uso comercial. Portanto, a economia de energia elétrica resultante deve ser utilizada para demonstrar a viabilidade técnica do equipamento desenvolvido e sua funcionalidade operacional.

Figura 4.2 – Temperaturas obtidas para E1.



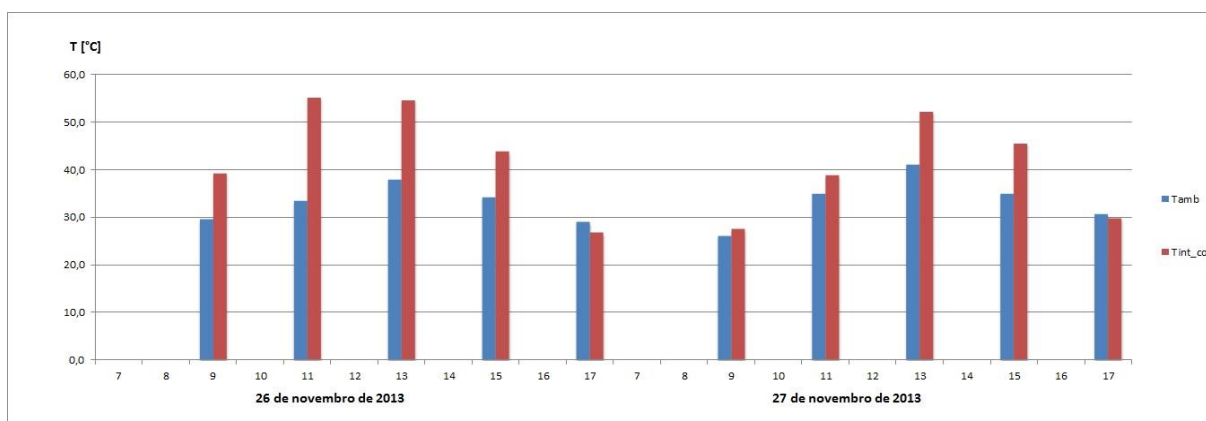
Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as amplitudes térmicas (diferença entre a máxima temperatura alcançada e a mínima) foram de 11,8°C, 40,0°C e 14°C, respectivamente,

para a temperatura ambiente, para o coletor solar e para a câmara de secagem, o que permite concluir que, com a utilização da câmara de secagem, as condições do ar ficam mais uniformes, o que favorece a realização da secagem de frutas com a obtenção de um produto de qualidade.

Essa é uma característica que diferencia o secador solar de exposição direta (sem câmara de secagem) do secador solar de exposição indireta. No secador com câmara de secagem o controle da variação da temperatura é mais eficiente. Isto é claramente observado quando se comparam os valores das temperaturas na Figura 4.2, obtidos nesse experimento usando-se um secador solar indireto, com os valores mostrados na Figura 4.3, que foram obtidos no secador solar de exposição direta durante a secagem de abacaxi, relatados por Nunes, Gomes e Grilo (2014), também ocorrida na cidade de Patos-PB.

Figura 4.3 – Valores de temperaturas obtidos para o secador de exposição direta.



Fonte: Adaptado de Nunes, Gomes e Grilo (2014).

A Figura 4.3 mostra que a máxima temperatura no interior do secador de exposição direta foi de 55,2°C às 11 h do dia 26 de novembro de 2013 enquanto a mínima foi de 26,7°C às 9 h do dia seguinte, isso dá uma amplitude de 28,5°C. Essa amplitude térmica elevada para as condições do ar de secagem pode, eventualmente, provocar irregularidades no abacaxi que esta sendo desidratado.

Na Tabela 4.1, são apresentados os valores obtidos para massa em cada hora, sendo a primeira medição as 7 h e a última do dia as 17 h, observando-se a mesma sequência no dia seguinte. Na mesma tabela são apresentados os valores calculados para as variáveis: massa de água (M_a), teor de umidade em base seca (X_{bs}), teor de umidade em base úmida (X_{bu}), taxa de secagem e razão de umidade (RU).

Tabela 4.1 – Valores obtidos em E1.

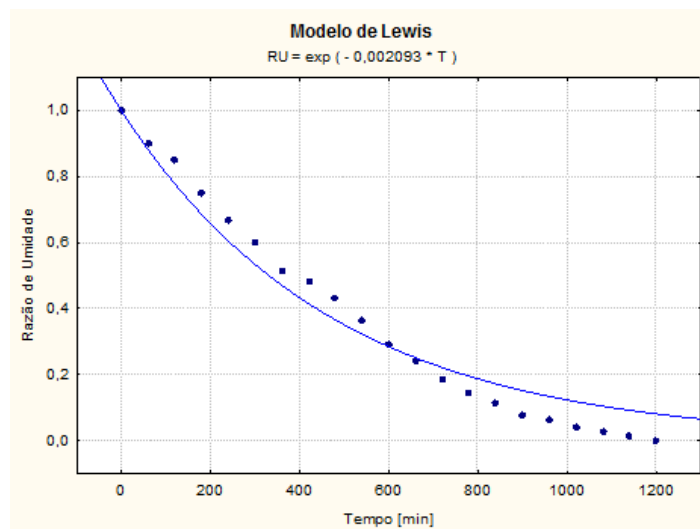
Tempo [min]	m_t [g]	m_{H_2O} [g]	X_{bs} $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}]$	X_{bu} $[\frac{m_{H_2O}}{m_t}]$	Taxa $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms} \cdot \text{min}}]$	RU
0	976	834	5,85	0,85	---	1,0000
60	898	756	5,30	0,84	0,0091	0,9021
120	858	716	5,02	0,83	0,0047	0,8519
180	776	634	4,45	0,82	0,0096	0,7491
240	713	571	4,00	0,80	0,0074	0,6700
300	659	517	3,62	0,78	0,0063	0,6023
360	587	445	3,12	0,76	0,0084	0,5119
420	565	423	2,97	0,75	0,0026	0,4843
480	525	383	2,68	0,73	0,0047	0,4341
540	470	328	2,30	0,70	0,0064	0,3651
600	412	270	1,89	0,65	0,0068	0,2923
660	370	228	1,60	0,61	0,0049	0,2396
720	328	186	1,30	0,57	0,0049	0,1870
780	296	154	1,08	0,52	0,0037	0,1468
840	271	129	0,90	0,47	0,0029	0,1154
900	242	100	0,70	0,41	0,0034	0,0790
960	230	88	0,61	0,38	0,0014	0,0640
1020	213	71	0,49	0,33	0,0020	0,0427
1080	202	60	0,42	0,29	0,0013	0,0289
1140	190	48	0,33	0,25	0,0014	0,0138
1200	179	37	0,26	0,20	0,0013	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, observa-se que o teor de umidade inicial do abacaxi era de 85% e que, depois de 20 (vinte) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 20%.

A curva de secagem mostrada na Figura 4.4, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.1, onde os pontos representam os valores de razão de umidade obtidos experimentalmente e a curva em linha cheia representa a cinética de secagem pelo modelo de Lewis.

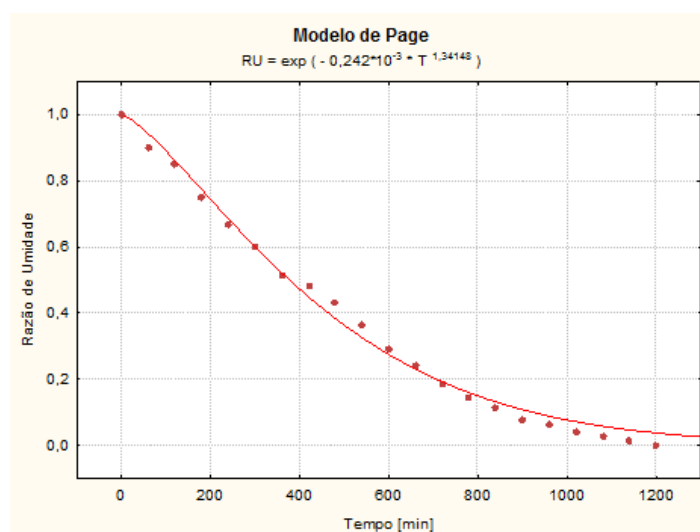
Figura 4.4 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E1.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.5, tem-se a curva de secagem obtida para o E1 ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.5 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E1.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que os valores experimentais obtidos no primeiro dia de teste se encontram acima ou próximos das linhas dos modelos matemáticos, enquanto que os do segundo dia se encontram abaixo das linhas. Isto indica que a cinética de secagem no primeiro dia foi maior, pois no primeiro dia foram retiradas 564 g de água do abacaxi enquanto no segundo dia foram retirados apenas 233 g de água. Fato esse que é explicado devido a facilidade de remoção da água no início do processo, quando o teor de umidade ainda está muito elevado.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições de E1 foi de 797 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 834 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 3.4.

Logo, substituindo-se os valores obtidos em E1, na Equação 3.4, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para E1 (η_{p1}), dada por:

$$\eta_{p1} = \frac{976 - 179}{834} = 95,56\%$$

Essa elevada eficiência do processo demonstra que com o uso da energia solar é possível obter eficiências equivalentes a de processos de secagem usando eletricidade ou GLP.

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 3.1 e 3.2. Para E1, a Equação 3.2 apresenta os seguintes valores:

- $\dot{m}_1 = 0,0135 \text{ kg/s}$
- $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$
- $\overline{\Delta T}_1 = 14 \text{ K}$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 3.2, a potência útil para E1 (P_{u1}) é dada por:

$$P_{u1} = 0,0135 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 14 \text{ K} = 0,1899 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 189,9 \text{ W}$$

Como a área de incidência da radiação solar sobre a cobertura transparente é 0,8 m² e a média da intensidade da radiação solar para os dias de E1 foi de 710,64 W/m², tem-se, substituindo esses valores na Equação 3.1, o rendimento térmico do equipamento obtido em E1 (η_{t1}), dado por:

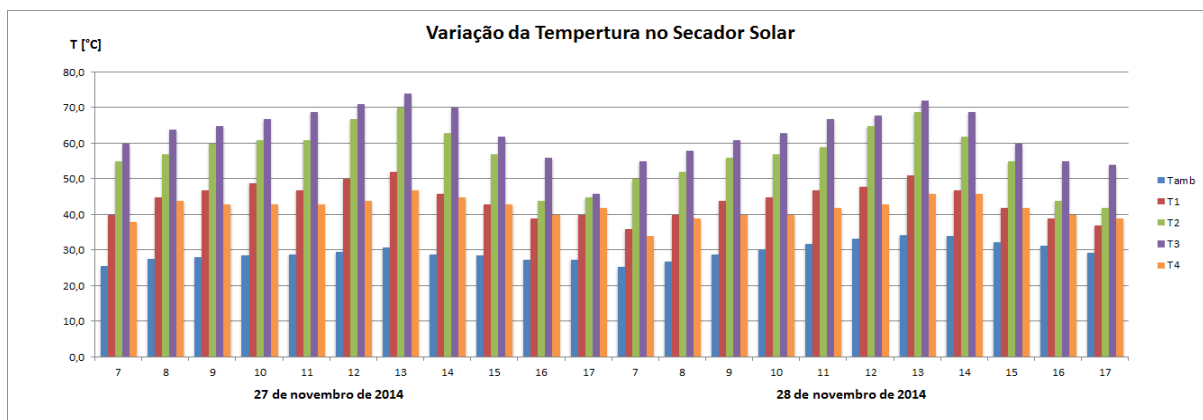
$$\eta_{t1} = \frac{189,9 \text{ W}}{0,8 \text{ m}^2 \cdot 710,64 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 33,40 \%$$

Como as análises de eficiência e rendimento seguem as mesmas sequências para os demais experimentos, na sessão 4.1.6 tem-se um resumo das principais variáveis envolvidas nessas análises. Desse modo, na descrição dos experimentos E2, E3, E4 e E5 apresentam-se apenas as tabelas com os parâmetros de secagem, bem como os gráficos de variação de temperatura durante cada teste, as respectivas curvas de secagem ajustadas pelos modelos matemáticos e os valores de rendimento térmico do equipamento e eficiência de cada processo.

4.1.2 Teste E2, realizado nos dias 27 e 28 de novembro de 2014.

Na Figura 4.6, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, em E2.

Figura 4.6 – Temperaturas obtidas para E2.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as amplitudes térmicas foram de 9,1°C, 38,0°C e 13°C, respectivamente, para a temperatura ambiente, para o coletor solar e para a câmara de secagem.

A seguir, é apresentada a Tabela 4.2 com os dados de parâmetros de secagem do experimento E2.

Tabela 4.2 – Valores obtidos em E2.

Tempo [min]	m_t [g]	m_{H₂O} [g]	X_{bs} $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}]$	X_{bu} $[\frac{m_{H_2O}}{m_t}]$	Taxa $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms} \cdot \text{min}}]$	RU
0	991	846	5,85	0,85	---	1,0000
60	902	757	5,23	0,84	0,0103	0,8896
120	861	716	4,95	0,83	0,0047	0,8387
180	778	633	4,38	0,81	0,0096	0,7357
240	716	571	3,95	0,80	0,0071	0,6588
300	664	519	3,59	0,78	0,0060	0,5943
360	592	447	3,09	0,76	0,0083	0,5050
420	563	418	2,89	0,74	0,0033	0,4690
480	534	389	2,69	0,73	0,0033	0,4330
540	468	323	2,23	0,69	0,0076	0,3511
600	418	273	1,89	0,65	0,0058	0,2891
660	371	226	1,56	0,61	0,0054	0,2308
720	331	186	1,29	0,56	0,0046	0,1811
780	296	151	1,05	0,51	0,0040	0,1377
840	269	124	0,86	0,46	0,0031	0,1042
900	240	95	0,66	0,40	0,0033	0,0682
960	230	85	0,59	0,37	0,0012	0,0558
1020	214	69	0,48	0,32	0,0018	0,0360
1080	200	55	0,38	0,28	0,0016	0,0186
1140	192	47	0,33	0,25	0,0009	0,0087
1200	185	40	0,28	0,22	0,0008	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, observa-se que o teor de umidade inicial do abacaxi era de 85% e que, depois de 20 (vinte) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 22%.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições de E2 foi de 806 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 846 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 3.4.

Logo, substituindo-se os valores obtidos em E2, na Equação 3.4, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para E2 (η_{p2}), dada por:

$$\eta_{p2} = \frac{991 - 185}{846} = 95,27\%$$

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 3.1 e 3.2. Para E2, a Equação 3.2 apresenta os seguintes valores:

- $\dot{m}_2 = 0,0139 \text{ kg/s}$
- $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$
- $\overline{\Delta T}_2 = 12 \text{ K}$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 3.2, a potência útil para E2 (P_{u2}) é dada por:

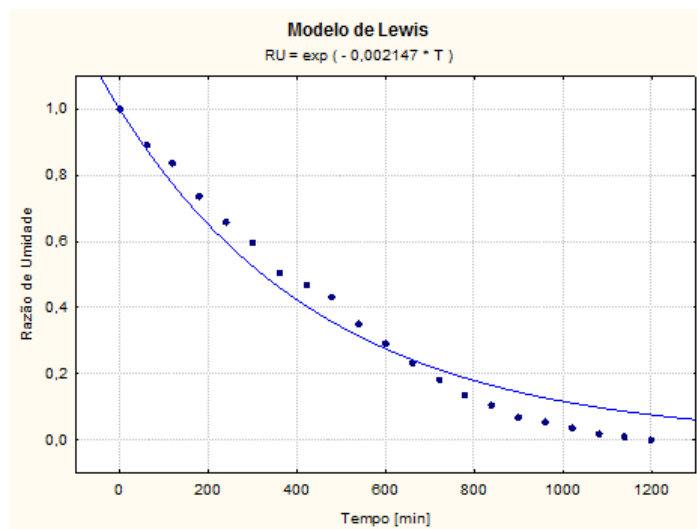
$$P_{u2} = 0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 12 \text{ K} = 0,1676 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 167,6 \text{ W}$$

Como a área de incidência da radiação solar sobre a cobertura transparente é $0,8 \text{ m}^2$ e a média da intensidade da radiação solar para os dias de E2 foi de $572,04 \text{ W/m}^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 3.1, o rendimento térmico do equipamento obtido em E2 (η_{t2}), dado por:

$$\eta_{t2} = \frac{167,6 \text{ W}}{0,8 \text{ m}^2 \cdot 572,04 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 36,62 \%$$

A curva de secagem para E2, mostrada na Figura 4.7, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.2, ajustada pelo modelo de Lewis.

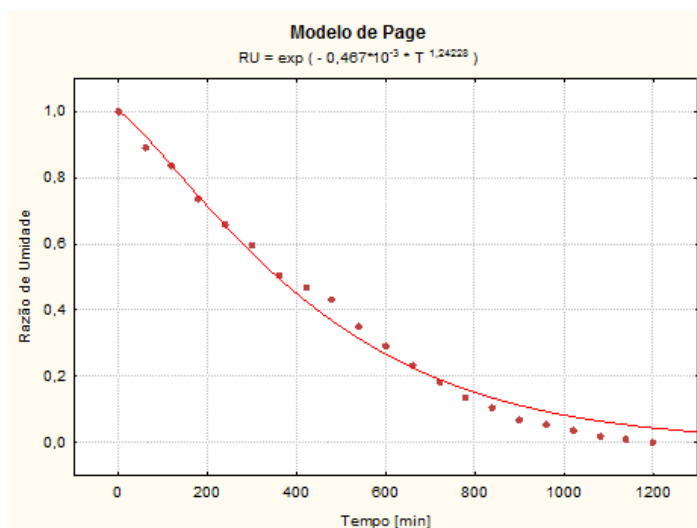
Figura 4.7 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E2.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.8 tem-se a curva de secagem obtida para E2 ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.8 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E2.

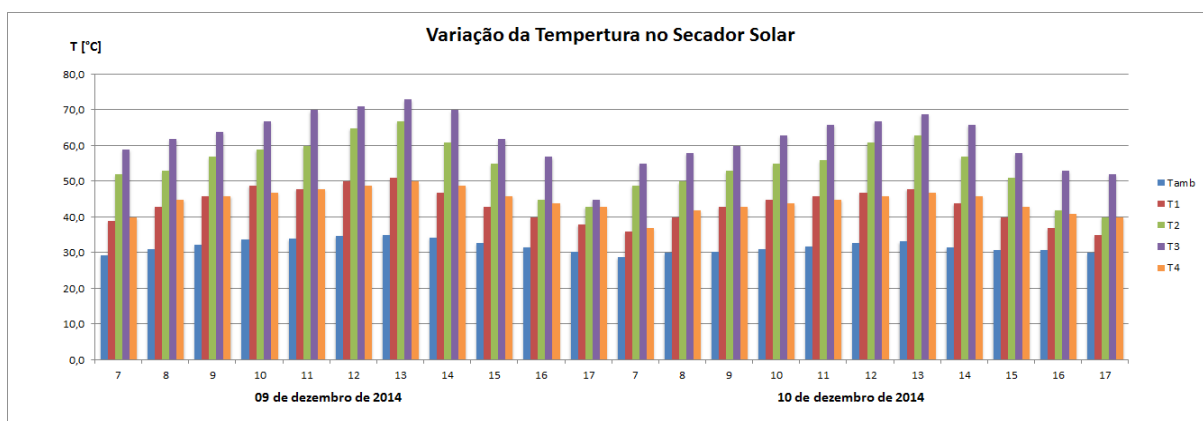


Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Teste E3, realizada nos dias 09 e 10 de dezembro de 2014.

Na Figura 4.9, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, em E3.

Figura 4.9 – Temperaturas obtidas para E3.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as amplitudes térmicas foram de 6,3°C, 38,0°C e 13°C, respectivamente, para a temperatura ambiente, para o coletor solar e para a câmara de secagem.

A seguir, é apresentada a Tabela 4.3 com os dados de parâmetros de secagem do experimento E3.

Tabela 4.3 – Valores obtidos em E3.

Tempo [min]	m_t [g]	m_{H_2O} [g]	X_{bs} $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}]$	X_{bu} $[\frac{m_{H_2O}}{m_t}]$	Taxa $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms} \cdot min}]$	RU
0	923	788	5,85	0,85	---	1,0000
60	840	705	5,23	0,84	0,0103	0,8895
120	802	667	4,95	0,83	0,0047	0,8389
180	724	589	4,37	0,81	0,0096	0,7350
240	667	532	3,95	0,80	0,0070	0,6591
300	618	483	3,59	0,78	0,0061	0,5939

360	551	416	3,09	0,76	0,0083	0,5047
420	524	389	2,89	0,74	0,0033	0,4687
480	497	362	2,69	0,73	0,0033	0,4328
540	436	301	2,24	0,69	0,0075	0,3515
600	389	254	1,89	0,65	0,0058	0,2889
660	345	210	1,56	0,61	0,0054	0,2304
720	308	173	1,29	0,56	0,0046	0,1811
780	276	141	1,05	0,51	0,0040	0,1385
840	250	115	0,86	0,46	0,0032	0,1039
900	223	88	0,65	0,40	0,0033	0,0679
960	214	79	0,59	0,37	0,0011	0,0559
1020	199	64	0,48	0,32	0,0019	0,0360
1080	186	51	0,38	0,28	0,0016	0,0186
1140	179	44	0,33	0,25	0,0009	0,0093
1200	172	37	0,28	0,22	0,0009	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, observa-se que o teor de umidade inicial do abacaxi era de 85% e que, depois de 20 (vinte) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 22%.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições de E3 foi de 751 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 788 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 3.4.

Logo, substituindo-se os valores obtidos em E3, na Equação 3.4, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para E3 (η_{p3}), dada por:

$$\eta_{p3} = \frac{923 - 172}{788} = 95,30\%$$

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 3.1 e 3.2. Para E3, a Equação 3.2 apresenta os seguintes valores:

- $\dot{m}_3 = 0,0139 \text{ kg/s}$
- $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$
- $\overline{\Delta T_3} = 13 \text{ K}$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 3.2, a potência útil para E3 (P_{u3}) é dada por:

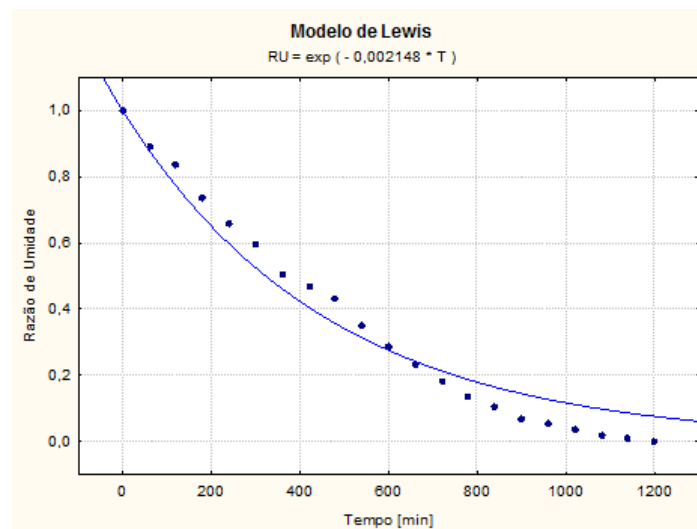
$$P_{u3} = 0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 13 \text{ K} = 0,1816 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 181,6 \text{ W}$$

Como a área de incidência da radiação solar sobre a cobertura transparente é $0,8 \text{ m}^2$ e a média da intensidade da radiação solar para os dias de E3 foi de $578,76 \text{ W/m}^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 3.1, o rendimento térmico do equipamento obtido em E3 (η_{t3}), dado por:

$$\eta_{t3} = \frac{181,6 \text{ W}}{0,8 \text{ m}^2 \cdot 578,76 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 39,22 \%$$

A curva de secagem para E3, mostrada na Figura 4.10, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.3, ajustada pelo modelo de Lewis.

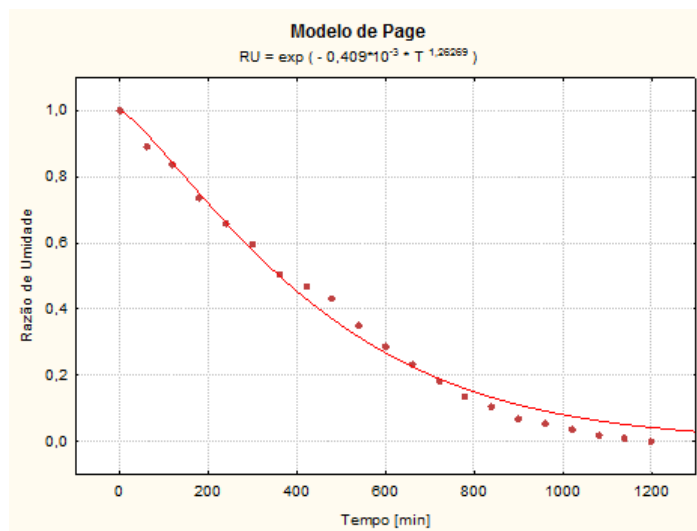
Figura 4.10 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E3.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.11 tem-se a curva de secagem obtida para E3 ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.11 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E3.

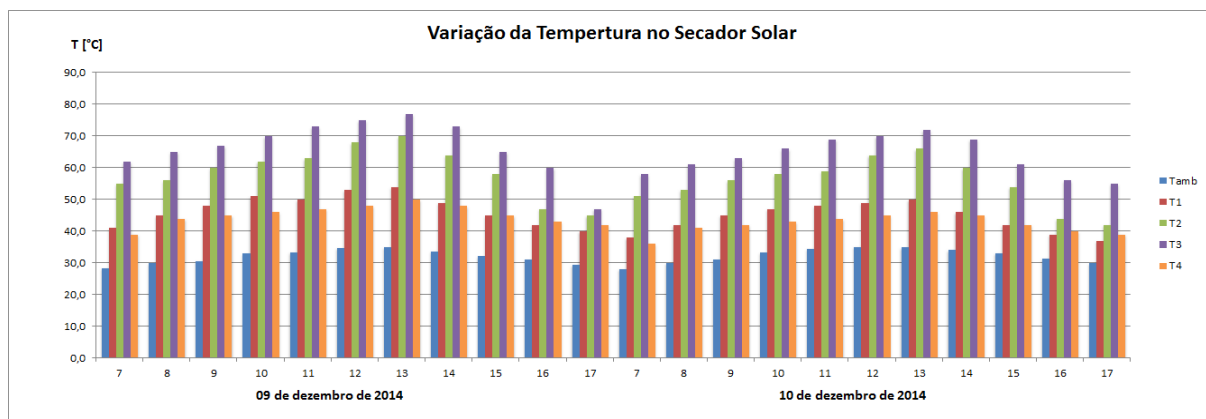


Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Teste E4, realizado nos dias 12 e 13 de dezembro de 2014.

Na Figura 4.12, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, em E4.

Figura 4.12 – Temperaturas obtidas para E4.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as amplitudes térmicas foram de 7,0°C, 40,0°C e 14°C, respectivamente, para a temperatura ambiente, para o coletor solar e para a câmara de secagem.

A seguir, é apresentada a Tabela 4.4 com os dados de parâmetros de secagem do experimento E4.

Tabela 4.4 – Valores obtidos em E4.

Tempo [min]	m_t [g]	m_{H₂O} [g]	X_{bs} $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}]$	X_{bu} $[\frac{m_{H_2O}}{m_t}]$	Taxa $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms} \cdot \text{min}}]$	RU
0	802	685	5,85	0,85	---	1,0000
60	741	624	5,33	0,84	0,0087	0,9060
120	705	588	5,02	0,83	0,0051	0,8505
180	636	519	4,43	0,82	0,0098	0,7442
240	587	470	4,01	0,80	0,0070	0,6687
300	537	420	3,59	0,78	0,0071	0,5917
360	483	366	3,12	0,76	0,0077	0,5085
420	462	345	2,95	0,75	0,0030	0,4761
480	429	312	2,66	0,73	0,0047	0,4253
540	391	274	2,34	0,70	0,0054	0,3667
600	340	223	1,90	0,66	0,0073	0,2881
660	308	191	1,63	0,62	0,0046	0,2388
720	276	159	1,36	0,58	0,0046	0,1895
780	243	126	1,08	0,52	0,0047	0,1387
840	227	110	0,94	0,48	0,0023	0,1140
900	201	84	0,72	0,42	0,0037	0,0740
960	190	73	0,62	0,38	0,0016	0,0570
1020	181	64	0,55	0,35	0,0013	0,0431
1080	172	55	0,47	0,32	0,0013	0,0293
1140	162	45	0,38	0,28	0,0014	0,0139
1200	153	36	0,31	0,23	0,0013	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, observa-se que o teor de umidade inicial do abacaxi era de 85% e que, depois de 20 (vinte) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 23%.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições de E4 foi de 649 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 685 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 3.4.

Logo, substituindo-se os valores obtidos em E4, na Equação 3.4, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para E4 (η_{p4}), dada por:

$$\eta_{p4} = \frac{802 - 153}{685} = 94,74\%$$

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 3.1 e 3.2. Para E4, a Equação 3.2 apresenta os seguintes valores:

- $\dot{m}_4 = 0,0135 \text{ kg/s}$
- $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$
- $\overline{\Delta T}_4 = 12 \text{ K}$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 3.2, a potência útil para E4 (P_{u4}) é dada por:

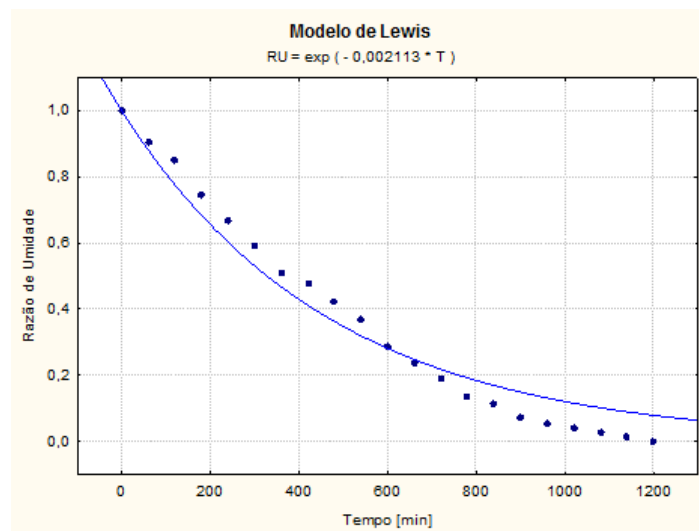
$$P_{u4} = 0,0135 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 12 \text{ K} = 0,1628 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 162,8 \text{ W}$$

Como a área de incidência da radiação solar sobre a cobertura transparente é $0,8 \text{ m}^2$ e a média da intensidade da radiação solar para os dias de E4 foi de $576,80 \text{ W/m}^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 3.1, o rendimento térmico do equipamento obtido em E4 (η_{t4}), dado por:

$$\eta_{t4} = \frac{162,8 \text{ W}}{0,8 \text{ m}^2 \cdot 576,80 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 35,28 \%$$

A curva de secagem para E4, mostrada na Figura 4.13, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.4, ajustada pelo modelo de Lewis.

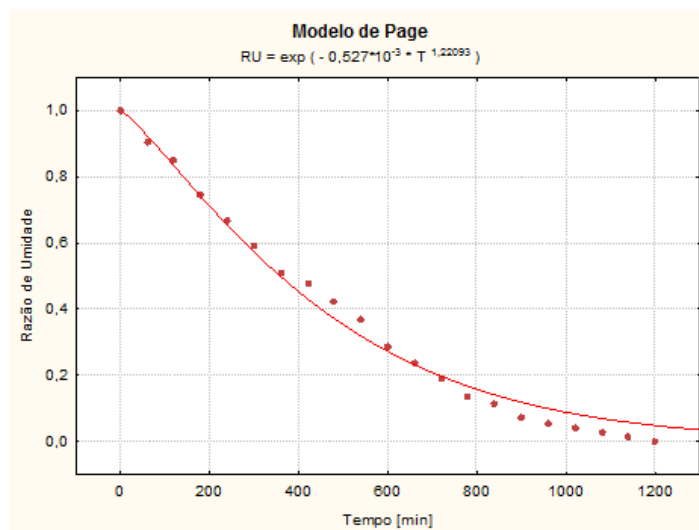
Figura 4.13 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E4.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.14 tem-se a curva de secagem obtida para E4 ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.14 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E4.

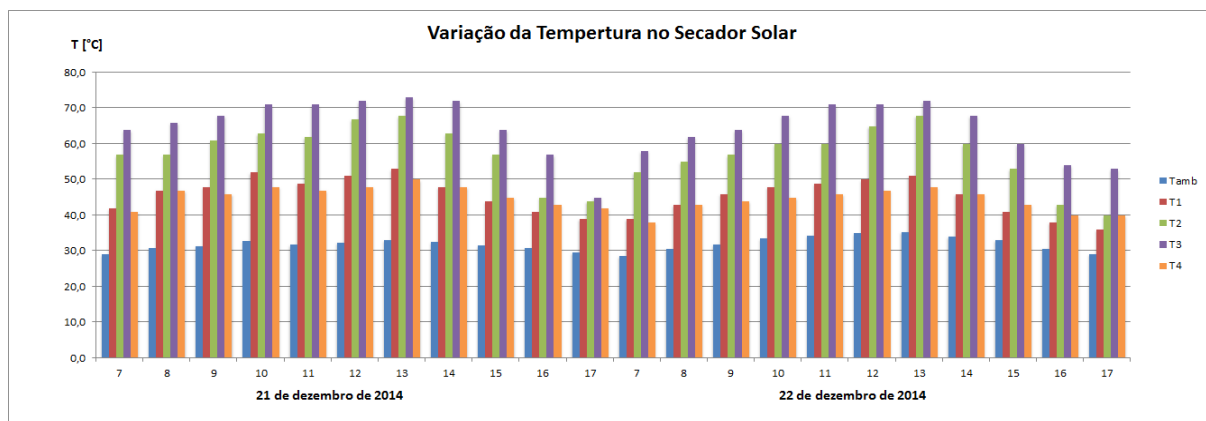


Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Teste E5, realizado nos dias 21 e 22 de dezembro de 2014.

Na Figura 4.15, podem-se observar os valores obtidos para as temperaturas no equipamento desenvolvido, em E5.

Figura 4.15 – Temperaturas obtidas para E5.



Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, verifica-se que as amplitudes térmicas foram de 6,9°C, 37,0°C e 12°C, respectivamente, para a temperatura ambiente, para o coletor solar e para a câmara de secagem.

A seguir, é apresentada a Tabela 4.5 com os dados de parâmetros de secagem do experimento E5.

Tabela 4.5 – Valores obtidos em E5.

Tempo [min]	m_t [g]	m_{H_2O} [g]	X_{bs} $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms}}]$	X_{bu} $[\frac{m_{H_2O}}{m_t}]$	Taxa $[\frac{m_{H_2O}}{m_{ms} \cdot \min}]$	RU
0	1154	986	5,85	0,85	---	1,0000
60	1071	903	5,36	0,84	0,0082	0,9108
120	991	823	4,88	0,83	0,0079	0,8249
180	918	750	4,45	0,82	0,0072	0,7465
240	845	677	4,02	0,80	0,0072	0,6681
300	779	611	3,62	0,78	0,0065	0,5972

360	718	550	3,26	0,77	0,0060	0,5317
420	662	494	2,93	0,75	0,0055	0,4715
480	609	441	2,61	0,72	0,0052	0,4146
540	561	393	2,33	0,70	0,0047	0,3631
600	513	345	2,04	0,67	0,0047	0,3115
660	471	303	1,80	0,64	0,0042	0,2664
720	429	261	1,55	0,61	0,0042	0,2213
780	391	223	1,32	0,57	0,0038	0,1805
840	355	187	1,11	0,53	0,0036	0,1418
900	325	157	0,93	0,48	0,0030	0,1096
960	297	129	0,76	0,43	0,0028	0,0795
1020	275	107	0,63	0,39	0,0022	0,0559
1080	256	88	0,52	0,34	0,0019	0,0354
1140	238	70	0,41	0,29	0,0018	0,0161
1200	223	55	0,32	0,24	0,0015	0,0000

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, observa-se que o teor de umidade inicial do abacaxi era de 85% e que, depois de 20 (vinte) horas de secagem, o teor de umidade final foi de 24%.

A variação total de massa obtida entre o início e término das medições de E5 foi de 931 g, esta foi, portanto, a massa total de água retirada do abacaxi. Considerando que a massa total de água no abacaxi, no início da secagem era de 986 g, a eficiência do processo de secagem é obtida pelo quociente entre a massa total de água retirada durante a secagem pela massa de água inicial, dada pela Equação 3.4.

Logo, substituindo-se os valores obtidos em E5, na Equação 3.4, tem-se a eficiência do processo de secagem obtida para E5 (η_{p5}), dada por:

$$\eta_{p5} = \frac{1154 - 223}{986} = 94,42\%$$

Para calcular o rendimento térmico do equipamento serão utilizadas as Equações 3.1 e 3.2. Para E5, a Equação 3.2 apresenta os seguintes valores:

- $\dot{m}_5 = 0,0135 \text{ kg/s}$
- $c_p = 1,0048 \text{ kJ/kg.K}$
- $\overline{\Delta T}_5 = 13 \text{ K}$

Assim, substituindo os valores obtidos na Equação 3.2, a potência útil para E5 (P_{u5}) é dada por:

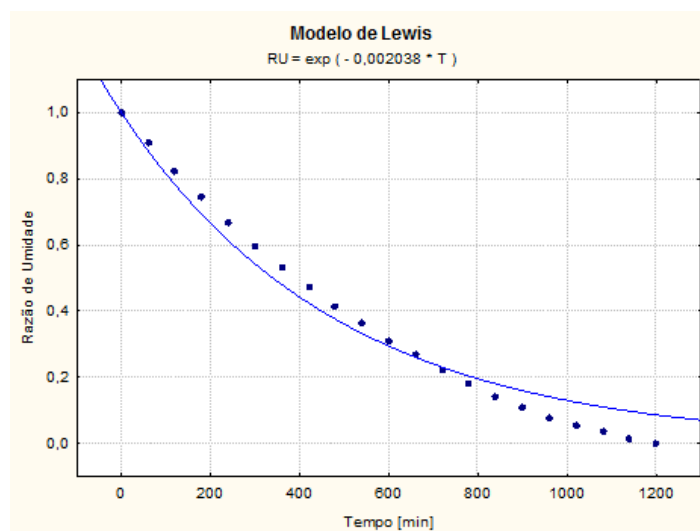
$$P_{u5} = 0,0135 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0048 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 13 \text{ K} = 0,1763 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 176,3 \text{ W}$$

Como a área de incidência da radiação solar sobre a cobertura transparente é $0,8 \text{ m}^2$ e a média da intensidade da radiação solar para os dias de E5 foi de $628,60 \text{ W/m}^2$, tem-se, substituindo esses valores na Equação 3.1, o rendimento térmico do equipamento obtido em E5 (η_{t5}), dado por:

$$\eta_{t5} = \frac{176,3 \text{ W}}{0,8 \text{ m}^2 \cdot 628,60 \text{ W/m}^2} \cdot 100 = 35,06 \%$$

A curva de secagem para E5, mostrada na Figura 4.16, é obtida através dos dados apresentados na Tabela 4.5, ajustada pelo modelo de Lewis.

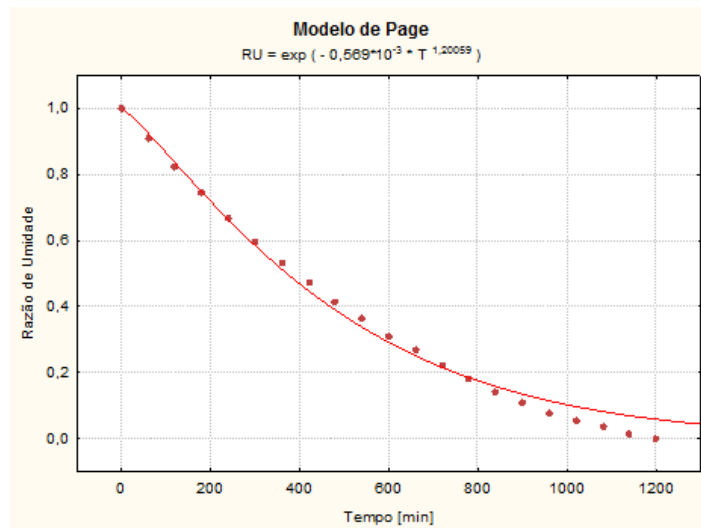
Figura 4.16 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Lewis para E5.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.17 tem-se a curva de secagem obtida para E5 ajustada pelo modelo de Page.

Figura 4.17 – Cinética de secagem do abacaxi ajustada pelo modelo de Page para E5.



Fonte: Próprio autor.

4.1.6 Resumo dos rendimentos do equipamento e das eficiências dos processos para cada experimento

○ **Rendimento do equipamento**

Para os cálculos de rendimento do equipamento, foi necessário que as temperaturas médias verificadas em cada ponto durante as coletas dos parâmetros de secagem fossem calculadas conforme Equação 4.1.

$$\bar{T} = \frac{\sum T}{n} \quad (4.1)$$

Portanto, na Tabela 4.6 estão alguns parâmetros das condições de secagem encontradas em cada processo.

Tabela 4.6 – Parâmetros de Secagem

Experimentos	Datas do Processo	\overline{Rad}	$\overline{T_{amb}}$	$\overline{T_{sai_cam}}$	$\overline{\Delta T}$	$\overline{V_{ar}}$
E1	15 a 16 / 11 / 2014	710,64	33	47	14	0,28
E2	27 a 28 / 11 / 2014	572,04	30	42	12	0,29
E3	09 a 10 / 12 / 2014	578,76	32	45	13	0,29
E4	12 a 13 / 12 / 2014	576,80	32	44	12	0,28
E5	21 a 22 / 12 / 2014	628,60	32	45	13	0,28

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 4.7 estão os dados referentes às propriedades do ar de secagem.

Tabela 4.7 – Propriedade do ar de secagem

Parâmetro	Valor	Unidade
Massa específica	1,201	kg/m ³
Calor Específico	1,0048	kJ/kg.K

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, tem-se, na Tabela 4.8, os valores referentes à potência transferida ao fluido de trabalho durante cada processo e, por conseguinte, o rendimento térmico do equipamento.

Tabela 4.8 – Potência útil e rendimento para cada processo.

Experimentos	Datas do Processo	$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ [W]	$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot I} \cdot 100$ [%]
E1	15 a 16 / 11 / 2014	189,9	33,40
E2	27 a 28 / 11 / 2014	167,6	36,62
E3	09 a 10 / 12 / 2014	181,6	39,22
E4	12 a 13 / 12 / 2014	162,8	35,28
E5	21 a 22 / 12 / 2014	176,3	35,06

Fonte: Próprio autor.

Logo, a média do rendimento do secador solar de frutas com aproveitamento multienergético é, aproximadamente, 36%. Portanto, o equipamento proposto apresenta um rendimento compatível com os equipamentos similares encontrados na literatura.

○ **Eficiência da secagem**

Pode-se inferir que a eficiência média dos processos de secagem é calculada como sendo a média das eficiências dos processos em cada secagem, de modo que se tem:

$$\overline{\eta_p} = \frac{\sum \eta_p}{n} \quad (4.2)$$

Onde,

$\overline{\eta_p}$ = média da eficiência dos processos.

Na Tabela 4.9 está os dados de teor de umidade alcançados (X_{buf}), bem como, as massas inicial e final dos produtos em cada processo de secagem com suas respectivas massas de água e, consequentemente, a eficiência de cada processo de secagem.

Tabela 4.9 – Resumo das eficiências dos processos de secagem.

Experimentos	Datas do Processo	X_{buf} [%]	$m_{inicial}$ [g]	m_{final} [g]	m_{H_2O} [g]	η_p [%]
E1	15 a 16 / 11 / 2014	20	976	179	834	95,56
E2	27 a 28 / 11 / 2014	22	991	185	846	95,27
E3	09 a 10 / 12 / 2014	22	923	172	788	95,30
E4	12 a 13 / 12 / 2014	23	802	153	685	94,74
E5	21 a 22 / 12 / 2014	24	1154	223	986	94,42

Fonte: Próprio autor.

Logo, a média da eficiência dos processos de secagem realizados no secador solar de frutas com aproveitamento multienergético é de, aproximadamente, 95%. Portanto, o equipamento proposto apresenta uma eficiência elevada para o processo de secagem, o que demonstra sua operacionalidade funcional.

○ **Significância estatística para os ajustes das cinéticas de secagem**

Para verificação da significância da correlação obtida entre os valores preditos e os valores obtidos experimentalmente faz-se necessário analisar os valores encontrados como coeficientes de correlação (R^2). Na Tabela 4.10 são apresentados os valores de R^2 para cada experimento em função do modelo matemático adotado para equação da cinética de secagem.

Tabela 4.10 – Resumo dos coeficientes de correlação obtidos para cada experimento.

Experimento	R^2 [%]	
	Modelo de Lewis	Modelo de Page
E1	98,22	99,65
E2	98,25	99,45
E3	98,25	99,49
E4	98,28	99,48
E5	98,67	99,60

Fonte: Próprio autor.

Segundo Rodrigues e Iemma (2009), para que uma equação possa ser utilizada na predição de um processo, o coeficiente de correlação deve ser superior a 95%. Portanto, ambos os modelos matemáticos analisados servem para predizer o momento no qual o processo atinge o teor de umidade desejado. No entanto, o Modelo de Page apresentou maior significância estatística, sendo, portanto, o modelo mais recomendado para análise do processo de secagem de abacaxi para o secador solar de frutas desenvolvido.

4.2 Custos de fabricação

Os custos referentes à fabricação de um equipamento levam em consideração o valor pago pelos materiais utilizados mais o valor cobrado pela mão-de-obra realizada por um profissional qualificado.

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores gastos com cada material, bem como as quantidades necessárias e o valor pago para o profissional responsável pela confecção do equipamento, calculado como sendo, aproximadamente, 30% dos gastos com material.

Tabela 4.11 – Planilha de custos para fabricação de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético.

Item	Unidade	Preço Unid. (R\$)	Quantidade	Valor (R\$)
MDF Ultra	m²	40,00	6	240,00
Polycarbonato	m²	35,00	1,2	42,00
Folha de Alumínio	m²	25,00	1	25,00
Velcro	m	1,00	8	8,00
Tela de Nylon	m²	4,00	2	8,00
Outros Materiais	unid.	50,00	1	50,00
<i>Coolers</i>	unid.	8,00	4	32,00
Painel Fotovoltaico	unid.	65,00	1	65,00
			Subtotal	470,00
Mão-de-obra	≅ 30% do Subtotal			140,00
TOTAL				610,00

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a pesquisa de mercado realizada, o pacote de abacaxi desidratado com 20 g, custa, aproximadamente, R\$ 5,00 (cinco reais). Como é possível obter uma

produção superior a 400 g por processo, tem-se um faturamento médio de R\$ 100,00 (cem reais), a cada processo realizado. No entanto, devem-se descontar ainda o preço da matéria-prima, além do transporte e das embalagens.

Mesmo assim, pode-se estimar que o investimento na confecção de um secador solar de frutas com aproveitamento multienergético tem seu retorno garantido em menos de seis meses, com a comercialização de frutas secas. Sendo, portanto, um produto economicamente viável para implantação nos processos de produção de abacaxi desidratado.

Capítulo V
CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados apresentados, pode-se concluir que o secador solar de frutas com aproveitamento multienergético, desenvolvido experimentalmente na UFCG e testado no processo de desidratação de abacaxi, mostrou-se compatível com os resultados esperados, funcionando plenamente e produzindo como resultado um produto final de elevado padrão de qualidade.

O rendimento térmico do equipamento de, aproximadamente, 36%, é compatível com os resultados descritos na literatura, o que demonstra que o sistema de captação da energia solar projetado é capaz de realizar, com eficiência, o processo de aquecimento do ar utilizado durante o processo de secagem.

A obtenção de uma eficiência média no processo em torno de 95% mostra a viabilidade técnica e operacional do equipamento, garantindo que o dimensionamento da câmara de secagem foi tecnicamente importante para conseguir a elevação desses valores. O que comprova que o sistema de secagem objeto desse estudo é eficiente para a desidratação de abacaxi.

Com os coeficientes de correlação encontrados nas análises de curvas de secagem, sempre superiores a 98%, comprovou-se que os modelos empíricos utilizados são aceitáveis para prever o tempo necessário para atingir valores de teor de umidade final para o abacaxi abaixo de 25% no processo de secagem, sendo que o modelo de Page conseguiu melhor significância estatística.

O equipamento desenvolvido foi construído com materiais de baixo custo, facilmente encontrados no comércio local, como forma de garantir um equipamento que possa ter sua tecnologia disseminada e que atenda à demanda dos produtores da região.

Sua operação e manutenção foram executadas sem necessidade de ações de elevada complexidade, o que comprovam sua facilidade de construção e operação, tornando-o uma tecnologia apropriada para inserção no ambiente comercial.

Os investimentos com a manutenção e operação do sistema de secagem dizem respeito, simplesmente, à degradação natural dos seus componentes. Tendo sua viabilidade econômica demonstrada com um tempo de retorno do investimento em torno de seis meses de comercialização de frutas secas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

- Desenvolvimento de um equipamento com materiais mais nobres, estrutura de aço inox e isolamento térmico por polietileno expandido, a fim de observar se o aumento de eficiência justifica o emprego de um secador com custos mais elevados;
- Utilização de um direcionador heliostático para obtenção do aumento do rendimento térmico do equipamento, relacionada ao posicionamento do sistema de secagem solar;
- Redesenho do secador solar utilizando técnicas de Desenho Industrial, como já experimentado no secador solar de exposição direta, para adequação do projeto proposto às exigências ergonômicas de manejo;
- Estudo da qualidade do produto final, através da medição de composição da fruta, verificando a manutenção de suas características nutricionais.
- Realização de testes do equipamento no processo de desidratação de outras frutas.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. T. E., GONÇALVES, C., PATERNIANI, M. E. A. G. Z., TUCCI, M. L. S., CASTRO, C. E. F. (Org.) **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 7ª Ed, Campinas-SP, Instituto Agrônômico, 452 p. 2014.

AKINOLA, O. A., AKINYEMI, A. A., BOLAJI, B. O. Evaluation of traditional and solar fish drying systems towards enhancing fish storage and preservation in Nigeria (Abeokuta Local Governments as Case Study). **Journal of Fisheries International**, Vol. 1, n. 2, p. 44-49, 2006.

BARBOSA, J. R. P. **Estudo da Viabilidade de Uso de Secadores Solares Fabricados com Sucatas de Luminárias**. Natal – RN, 2011, 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro – RJ, 2008, 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. **Resolução RDC nº 272/05 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Aprova o Regulamento Técnico para Produtos de Vegetais, Produtos de Frutas e Cogumelos Comestíveis. Diário Oficial: Brasília, 23 de set. 2005.

CANO-CHAUCA, M., RAMOS, A.M., STRINGHETA, P.C., MARQUES, J.A., SILVA, P.I. **Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa**. Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, Vol. 22, n.1, p.121-132, 2004.

COSTA, A. R. S. **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. Natal-RN, 2008, 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2008.

CUNHA, G. A. P. **Equipe técnica de abacaxi comemora 30 anos de atividades e realizações**. Documentos, 170. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. 20 p. 2007.

DALPASQUALE, V. A. **Procedimentos essenciais de recepção e limpeza de grãos**. In: LORINI, I., MIIKE, L.H. ; SCUSSEL, V.M. Armazenagem de grãos. Campinas-SP, Instituto Biogenesis, p.191-212, 2002.

FAO – Organização da Agricultura e Alimentação. **Produção de Mercadorias Agrícolas e Alimentares / País por Mercadoria**. 2014. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/rankings/countries_by_commodity/E>, acesso em: 10 nov. 2014.

FIGUEIREDO, R. M. F., QUEIROZ, A. J. M., NORONHA, M. A. S. Armazenamento de abacaxi minimamente processados. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande-PB, n. 1, p. 95-103, 2003.

FIORENTIN, L. D., MENON, B. T., ALVES, J. A., BARROS, S. T. D., PEREIRA, N. C., LIMA, O. C. M., MODENES, A. N. **Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos**. ENGEVISA, Rio de Janeiro-RJ, Vol. 14, n. 1, p. 22-33, 2012.

FIOREZE, Romeu. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa-PB. 229 p. Editora Universitária da Universidade Federal da Paraíba, 2004.

GOMES, I. A., NUNES, A. G., GRILO, M. B. **Testes experimentais em um secador termo solar de exposição indireta usado para produzir banana-passa**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, V CBES, 2014, Recife-PE. Anais do V CBES, Vol. 1, p. 1-8, Recife: ABENS, 2014a.

_____. **Testes experimentais em um secador solar de exposição indireta usado para produção de abacaxi desidratado**. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA

ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, CONTECC, 2014, Teresina, PI. Inovação Tecnológica para o Desenvolvimento Nacional. Vol. 1, p. 1-4, 2014b.

GONÇALVES, N. B. (Org.) **Abacaxi: pós-colheita**. Brasília-DF, EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, cap. 2, p. 13-27, 2000.

GOUVEIA, J. P. G., ALMEIDA, F. A. C., FARIAS, E. S., SILVA, M. M., CHAVES, M. C. V., REIS, L. S. **Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande – PB, Ed. Especial, n.1, p. 65-68, 2003.

GRILO, M. B. **Fundamentos da Energia Solar: conceitos básicos e aplicações**. 1ª edição, Editora da Universidade Federal de Campina Grande, EDUFPG, 60 p., 2007.

GUERRA, M. I. S., VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró (RN). **Revista Holos**, Mossoró, RN. Ano 30, Vol. 4, p. 241-268, 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil**. Rio de Janeiro, RJ, Vol. 27, n. 10, 117 p., Outubro, 2014.

IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas. **Panorama da cadeia produtiva das frutas em 2012 e projeções para 2013**. Brasília, DF, 127 p., 2013.

LACERDA, A. F. **Redesenho do secador solar compacto para produção de banana-passa**. Campina Grande-PB, 2012, 46 p., Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Desenho Industrial) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Desenho Industrial, 2012.

LEVY-COSTA, R. B., SICHIERI, R., PONTES, N. S., MONTEIRO, C. A. Disponibilidade domiciliar de alimentos no Brasil: distribuição e evolução (1974-2003). **Revista Saúde Pública**, Vol. 39, n. 4, p. 530-540, 2005.

LIMA, A. G. B. de. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana.** Campinas-SP, 1999, 265 p., Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, 1999.

LIMA, A. G. B. de, SILVA, E. G. da, SPAROVEK, G., STURION, G. L., PRECOPPE, M. F. de M., MEIRA M. L. R., SPOTO, M. H. F., MORAES, S. O. **Manual de desidratação solar de frutas, ervas e hortaliças.** Série Produtor Rural – n. 33. Piracicaba-SP: Universidade de São Paulo-USP, 50 p., 2006.

MACHADO, A. V. **Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistema convencional e solar: modelagem e simulação do processo.** Natal, RN, 2009, 143 p., Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2009.

MASSAUD, F. C. **Simulação de secagem de cenoura (*Daucus carota L.*) em secador de bandeja.** Viçosa-MG, 2004, 114 p., Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal de Viçosa, 2004.

MATOS, E. H. S. F. **Dossiê Técnico: processamento de frutas desidratadas.** Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Brasília-DF, 2007. Disponível em: <<http://respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NDE=>>, acesso em: 07 jul. 2014.

NASCENTE, A. S., COSTA, R. S. C., COSTA, J. N. M. **Cultivo do Abacaxi em Rondônia.** Porto Velho-RO, EMBRAPA RONDÔNIA, Sistemas de Produção, Vol. 3, 2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Abacaxi/CultivodoAbacaxiRO/index.htm>>, acesso em: 05 jul. 2014.

NEUTZLING, M. B., ROMBALDI, A. J., AZEVEDO, M. R., HALLAL, P. C. Fatores associados ao consumo de frutas, legumes e verduras em adultos de uma cidade no Sul do Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, Porto Alegre-RS, Vol. 25, n. 11, p. 2365-2374, 2009.

NUNES, A. G. ; GOMES, I. A ; GRILO, M. B . **Testes experimentais com secador solar de exposição direta para desidratação de abacaxi**. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2014, Uberlândia-MG, CONEM 2014, Vol. 8, p. 1-7, 2014.

NUNES, A. G., GOMES, I. A., JUNIOR, J. S. S., GRILO, M. B. Estudos para determinação do modelo matemático representativo de experimentos com secagem de banana usando energia solar e gás liquefeito de petróleo. **Revista Magistra**, UFSC, Ilhéus, BA. Vol. 25, número especial, 2013.

OLIVEIRA, R. A., OLIVEIRA, W. P., PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Revista Engenharia Agrícola**, Vol. 26, n.1, p.181-189, 2006.

OMS – Organização Mundial da Saúde. **Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases**. WHO Technical Report Series, nº 916, Genebra, 2003.

ORIKASA, T., WUB, L., SHIINA, T., TAGAWA, A. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. **Journal of Food Engineering**, Vol. 85, n. 2, p. 303-308, 2008.

PANCHARIYA, P. C., POPOVIC, D., SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, Vol. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

PARK, K. J. B., ALONSO, L. F. T., CORNEJO, F. E. P., FABBRO, I. M. D., PARK, K. J. Seleção de secadores: fluxograma. Campina Grande-PB, **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Vol. 9, n. 2, p. 179-202, 2007.

QUINTERO, A. C. F. **Desidratação de abacaxi: modelos de secagem, avaliação de qualidade e efeito de embalagem**. Viçosa-MG, 2007, 98 p., Dissertação (Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal de Viçosa, 2007.

REINHARDT, D. H., SOUZA, L. F. S., CABRAL, J. R. S. (Org.) **Abacaxi. Produção: aspectos técnicos**. Brasília, DF, EMBRAPA: Comunicação para Transferência de Tecnologia, 77 p., 2000.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 2ª ed., São Paulo-SP, 358 p., 2009.

SILVA, J. S., DONZELLES, S. M. L., CORRÊA, P. C. **Secagem e secadores**. In: Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas. Viçosa-MG, Editora Aprenda Fácil, Cap. 5, p. 107-138, 2000.

SILVA, T. S. **Estudo de um secador solar fabricado a partir de sucata de tambor de polietileno**. Natal-RN, 2013, 78 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

SOARES, A. G. **Desperdício de Alimentos no Brasil – um desafio político e social a ser vencido**. Rio de Janeiro-RJ, EMBRAPA, 5 p., 2002.

TORREGGIANI, D., BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. **Journal of Food Engineering**, Vol. 49, p. 247-253, 2001.

ULRICH, K. T., EPPINGER, S. D. **Product Design and Development**. 2ª ed., New York: McGraw-Hill, 2000.

WAEWSAK, J., CHINDARUKSA, S., PUNLEK, C. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. **Thammasat International Journal of Science and Technology**, Vol. 11, n. 1, p. 14-20, 2006.